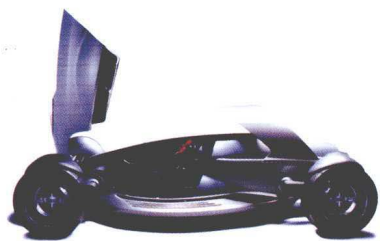
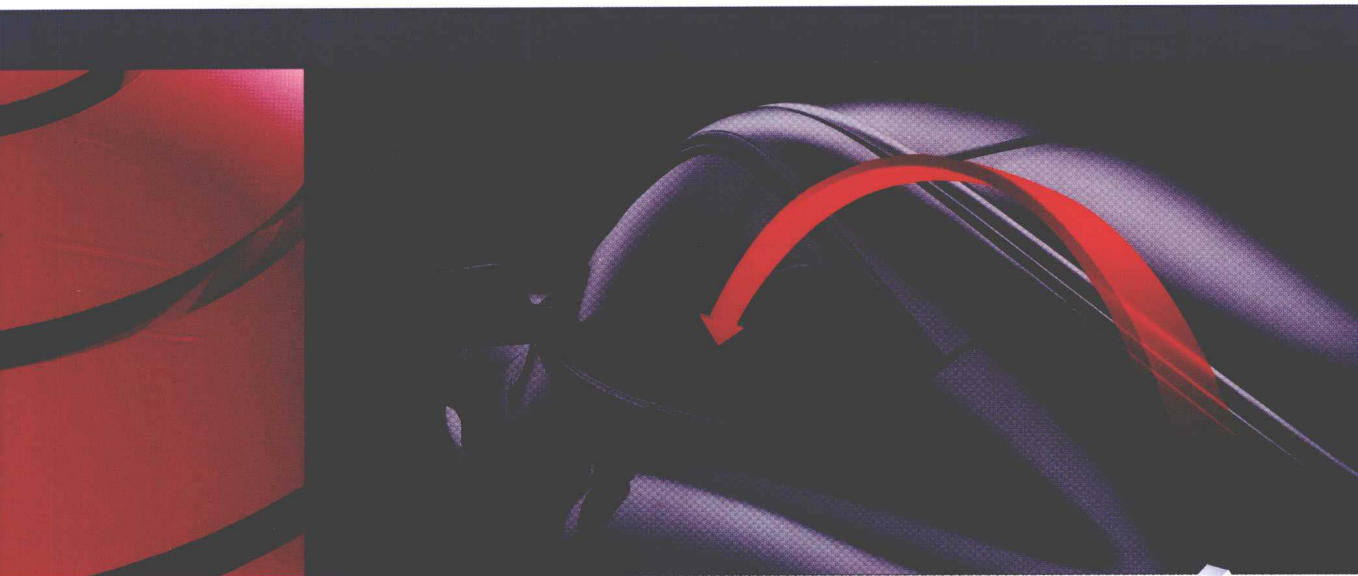


◆ 国家自然科学基金资助项目 ◆



AUTOMOBILE
DESIGN &
AERODYNAMICS

汽车设计 空气动力学



傅立敏 ○ 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国家自然科学基金资助项目

汽车设计与空气动力学

傅立敏 著



机械工业出版社

前 言

汽车空气动力特性对汽车的动力性、经济性和行驶安全性有重要影响。近年来，随着我国高等级公路的发展和汽车车速的提高，人们对汽车空气动力特性更加关注。

汽车设计不仅要追求良好的空气动力特性，同时还应满足人体工程学、机械工程学和美学的要求。本书从汽车空气动力学的发展历史出发，以汽车尾流的结构特性为主，论述了汽车设计与空气动力特性的关系，并且从理论、试验、研究、空气动力学的应用技术、空气动力学的数值计算(CFD)技术等方面介绍了诸如发动机冷却、驾驶室内空调、泥土上卷、刮水器上浮以及空气动力学噪声等汽车设计中应注意的空气动力学问题。本书所介绍的上述研究内容均为作者进行国际前沿课题研究的成果。书中还介绍了作者主持建成的中国首座汽车风洞——吉林大学汽车风洞。书中汽车尾流结构一章的部分内容取自作者获“中国期刊优秀论文奖”的论文。

作者于1998年出版了《汽车空气动力学》一书后，有大量读者来信、来访。应广大读者的要求，作者将三十多年来从事汽车车身结构设计、汽车造型设计、汽车空气动力学研究、吉林大学汽车风洞建设等工作的经验进行了进一步总结，在此基础上完成了本书。

本书得到国家自然科学基金课题的资助(课题号:60222207、19672021)，985项目和211工程项目的资助。

在撰写本书的过程中，得到了贺宝琴博士、吴允柱博士、范爱华老师以及课题组全体同仁的帮助。在书稿整理过程中，得到了重庆理工大学石晓辉副校长的鼎力支持和重庆汽车学院汽车零部件及其检测技术教育部重点实验室的资助，以及重庆理工大学袁冬梅老师和该校汽车学院师生给予的大力协助，在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限，对本书的错误及不足之处，欢迎读者指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 汽车空气动力学的重要性	1
第二节 汽车空气动力学的发展	5
第三节 汽车空气动力学的研究内容	23
第四节 气动力和力矩	24
第五节 汽车的阻力特性	29
第六节 与汽车相关的流场	31
第七节 汽车空气动力学的特点及 相关学科	33
第八节 汽车外形与空气动力特性 的关系	35
第九节 车身外形的最佳化	41
第二章 空气动力学与汽车设计	48
第一节 不可压流体特性	48
第二节 流体阻力的理论	49
第三节 汽车的绕流特性	54
第四节 汽车空气动力学设计	70
第五节 最佳气动外形	78
第三章 汽车尾流结构特性	82
第一节 典型外形汽车尾流结构的 试验研究	82
第二节 PIV 技术在汽车尾流瞬态测量 中的应用	95
第三节 典型外形汽车尾流结构的数值 计算研究	100
第四章 汽车发动机冷却系的空气动力 特性	109
第一节 汽车发动机室内的流动特性	109
第二节 降低发动机冷却系气动阻力	113
第三节 发动机冷却系的设计原则	120
第五章 汽车驾驶室的通风与空调	122
第一节 对驾驶室的环境要求	122
第二节 节能空调系统	123

第六章 汽车空气动力噪声	132
第一节 流场中的声源	132
第二节 汽车气动噪声分析	139
第三节 汽车气动噪声的特性	141
第四节 汽车气动噪声的测定	149
第五节 典型的汽车气动噪声分析	153
第六节 汽车周围的流场与汽车的气动 噪声	157
第七节 用 CFD 预测气动噪声	158
第七章 汽车空气动力学应用技术	164
第一节 汽车车身上的泥土附着	164
第二节 刮水器上浮	167
第三节 活顶轿车的空气动力特性	172
第四节 汽车车轮的空气动力特性	175
第八章 空气动力学措施对现代商用 汽车燃料经济性及动力性的 影响	180
第一节 商用汽车空气动力特性的改进	180
第二节 用空气动力学附加装置降低国 产载货汽车气动阻力的研究	196
第三节 商用汽车气动阻力分析	199
第九章 汽车空气动力学试验研究	205
第一节 汽车空气动力学试验技术概述	205
第二节 汽车风洞	208
第三节 汽车空气动力学流态显示试验	231
第四节 汽车空气动力学道路试验	235
第五节 实车道路试验与实车风洞试验的 数据对比分析	238
第六节 非定常气动力的测定试验	239
第七节 驾驶室通风试验	241
第十章 空气动力特性对汽车操纵稳定 性的影响	243
第一节 汽车的侧风稳定性	243
第二节 实际侧风问题	248

第三节	侧风下汽车的空气动力特性 ·····	249	第五节	解放 CA1091P、CA1091KP 载货 汽车空气动力特性研究 ·····	306
第四节	空气动力特性参数与汽车高速操纵 稳定性的关系 ·····	254	第十二章	汽车空气动力学数值计算 ···	310
第十一章	国产汽车空气动力特性 研究 ·····	261	第一节	空气动力学数值计算概述 ·····	310
第一节	国产小公共汽车空气动力特性 研究 ·····	261	第二节	CFD 在汽车空气动力学中 的应用 ·····	314
第二节	国产轿车空气动力特性研究 ·····	264	第三节	非粘性流方法 ·····	327
第三节	国产载货汽车空气动力特性 研究 ·····	286	第四节	N—S 方程的简化 ·····	338
第四节	用侧风发生器进行侧风稳定性 试验 ·····	301	第五节	N—S 方程的解法 ·····	344
			第六节	结束语 ·····	345
			参考文献	·····	347

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关键和基础,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,本书将分别进行叙述,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、汽车的重量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

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

式中 v_{\max} ——最高车速;

F_{\max} ——最大驱动力;

G ——汽车重量;

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

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

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；

P_t ——发动机功率；

G ——汽车重量；

f ——摩擦系数；

ρ ——空气密度；

C_D ——气动阻力系数；

A ——汽车正面投影面积；

v_a ——车速；

η_T ——汽车传动系统效率。

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 ——作用在前、后轴上的汽车重量分配值；

L_F 、 L_R ——作用在前、后轴上的气动升力；

f_F 、 f_R ——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 $v = 80\text{km/h}$ 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汽车所需的功率。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

$$P = \frac{C_D \rho A v_a^3}{2\eta_T} \tag{1-4}$$

式中 ρ ——空气密度；
 C_D ——气动阻力系数；
 A ——汽车正面投影面积；
 v_a ——车速；
 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。

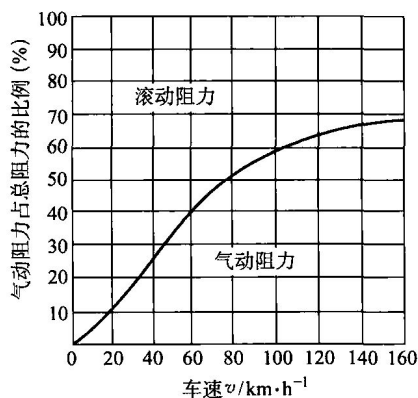


图 1-1 气动阻力占总阻力的比例

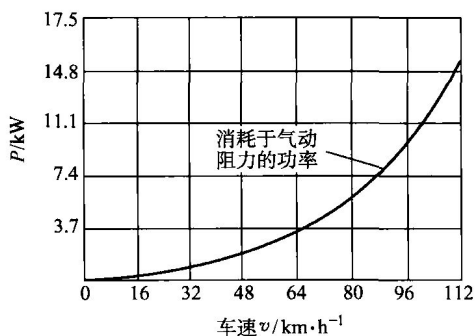
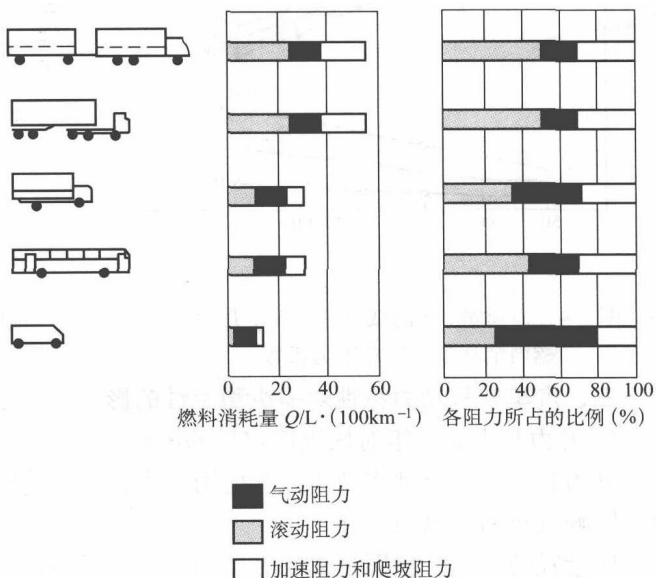


图 1-2 消耗于气动阻力的功率

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，为 32% 左右。

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，国产汽车降低气动阻力大有潜力。通过空气动力学特性改进，红旗 CA774 轿车气动阻力系数可从 0.42 降到 0.25，首都 630、红星 621、沈阳 622B 小公共汽车气动阻力系数可从 0.62、0.481、0.77 分别降低到 0.44、0.40、0.44。降低气动阻力系数对燃料经济性的改善是极其可观的。



燃料消耗量 $Q/L \cdot (100\text{km}^{-1})$ 各阻力所占的比例 (%)

■ 气动阻力
 ■ 滚动阻力
 □ 加速阻力和爬坡阻力

图 1-3 各种车辆每 100km 的燃料消耗量

例如,轿车 C_D 从 0.42 降到 0.30, 在混合循环时, 燃料经济性可改善 9% 左右, 而当车辆以 150km/h 速度行驶时, 燃料经济性竟能改善 25% 左右。

本书第十一章将介绍笔者进行的国产 CA141 载货汽车加与不加空气动力学附加装置的公路实车百公里油耗试验, 得出的百公里油耗降低量如表 1-1 所示。试验表明, 加前阻风板、篷和导流罩等空气动力学附加装置, 可使 CA141 载货汽车的油耗降低 2~4L/100km。

表 1-1 百公里油耗降低量 (单位: L/100km)

	车速 $v/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	加前阻风板	加篷	加货箱及保险架辅助板	加篷和导流罩
满载	45	0.5~0.8	3~3.5	0.2~0.5	3~4
空载	45	0.2~0.5	2~3	0.15~0.2	2~3.5
	65	1~2	3.5~3.9	1~1.5	3.5~4.2

如上述附加装置能采用, 一辆 CA141 载货汽车年油耗节省量可这样估算: 假设货车以 45km/h 的平均车速, 每天行驶 7h, 每年使用 260 天则每年行驶里程为 81900km, 采用空气动力学附加装置后年油耗节省量为 1638~3272L。由此可见, 节油成果是非常可观的。

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。

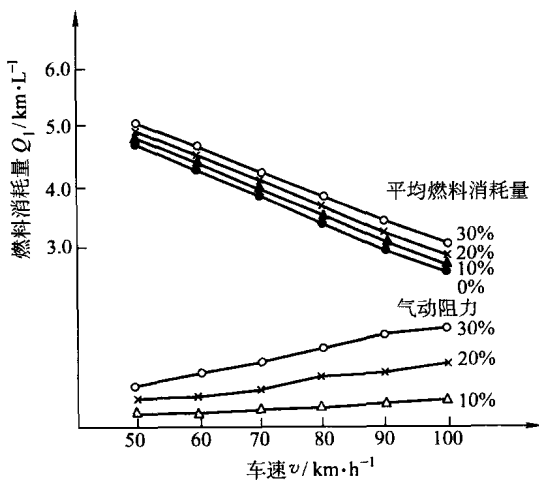


图 1-4 总质量 20t 的载货汽车 6 个月的燃料消耗量与气动阻力系数

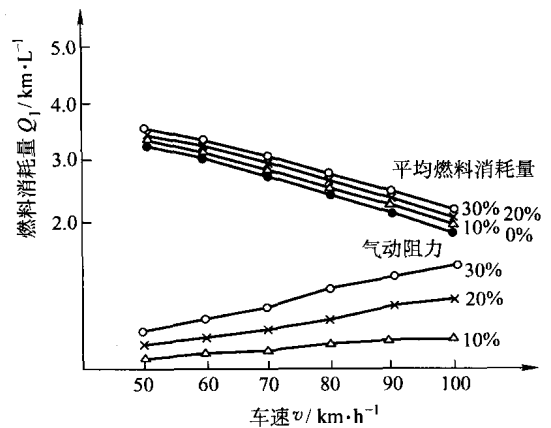


图 1-5 总质量 32t 的全挂牵引车 5 个月的燃料消耗量和气动阻力系数

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。这种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牛顿甚至几千牛顿。这一附加的力将使前轮负荷减轻,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摇头,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 轴回轉的横摆力矩。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。对应于力矩回轉的方向,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,只有具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,因而越来越受到重视。

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,至今已有一百多年的历史。通过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，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的问题。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二十五年，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。

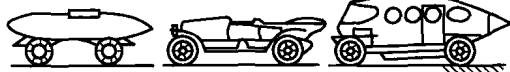




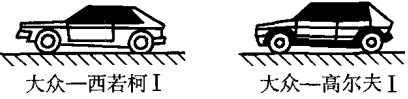
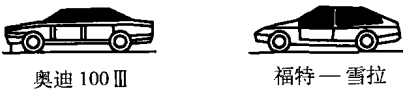
特征	年份	车型
基本形状化	1900 ~ 1930	 鱼雷形 船尾形 汽艇形
	1921 ~ 1939	 拉普勒 布卡提
流线形化	1922 ~ 1939	 杰瑞
	1934 ~ 1939	 康贝 舒勒
	1955	 雪铁龙 NSU—Ro80
细部优化	1974	 大众—西若柯 I 大众—高尔夫 I
整体优化	1983	 奥迪 100 III 福特—雪拉

图 1-6 汽车空气动力学的四个发展阶段

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。

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阿尔法·罗密欧汽车。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。

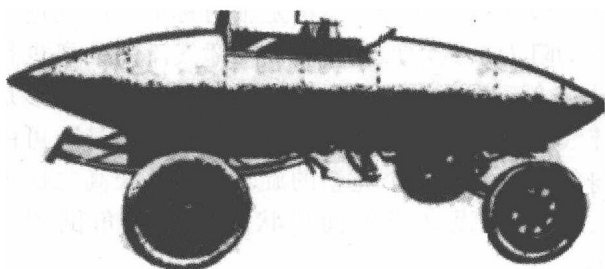


图 1-7 最早按空气动力学观点设计的汽车

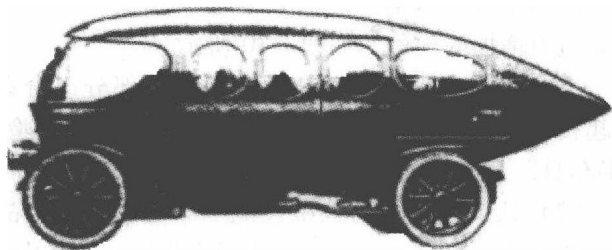


图 1-8 1913年问世的具有飞艇形状的阿尔法·罗密欧汽车

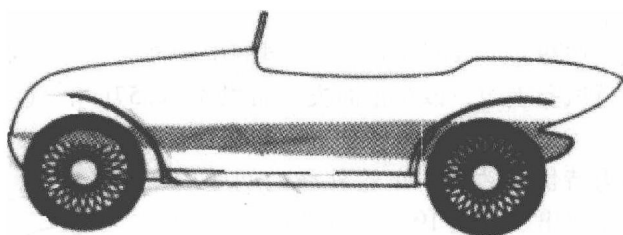


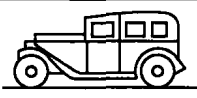




图 1-9 采用船形外形的高速敞篷车(1912年N·A·G)

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 Rumpler)。

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。

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		0.09

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师采用。

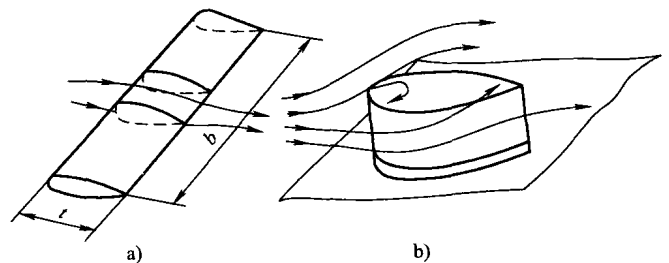
图 1-10 杰瑞汽车及其“半车身”阻力测定 (W. Klemperer 1922 年的试验)

(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(Rumpler)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。

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 $A = 2.57m^2$ ，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

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

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。

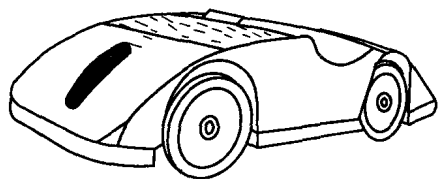


图 1-12 1923 年 Bagatei 按三维理论设计的 Sterrasburg Grand Pnix

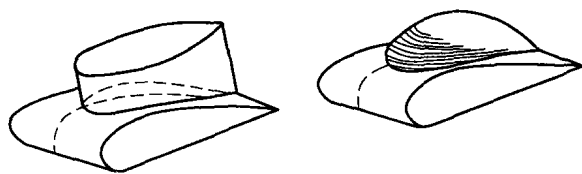


图 1-13 杰瑞的两种“合成型式”简图

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 (奥迪) 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，车身过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

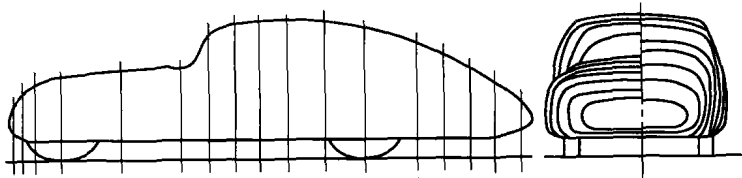


图 1-14 朗日车

所示，该车长高比为 3.52:1，底部由等截面体构成，上部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，必须保持车身前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。

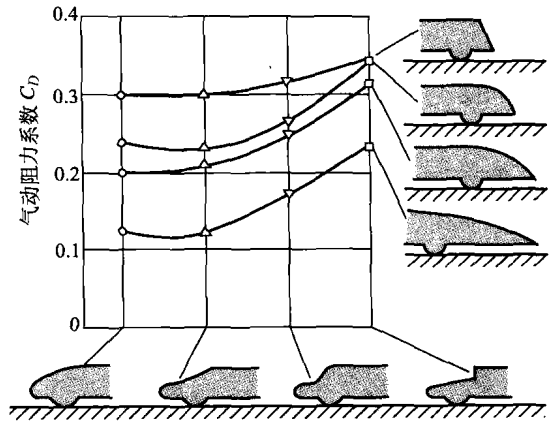


图 1-15 主要车身参数对气动阻力的影响及它们之间的相互作用

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”(Kammback)，既有较大的后排座，前端外形又保持低的气动阻力系数。图 1-16 为快背式、雷氏粗尾形和克氏长尾形的几种设计。由于气流在尽可能大的区域内保持连续，从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，气流被迫分离而造成小的涡流。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。

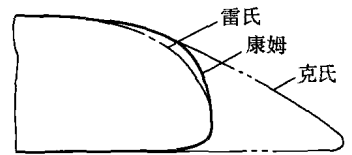


图 1-16 快背式、雷氏粗尾形和克氏长尾形的几种设计

(6) 切尾可明显降低阻力 1936 年，R. V. Koenig-Fachsenfold 通过公共汽车的模型试验研究，证明了汽车采用切尾的方法有明显的降低阻力的优点。他是切尾的发明者。

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。1938 年，第一辆具有快背式后尾的车——艾沃林车问世(图 1-17)。此后，他又继续研制了几种车，外形设计有所进步，但由于第二次世界大战爆发而未能投产。图 1-18 为快背式车与两种杰瑞车的比较。

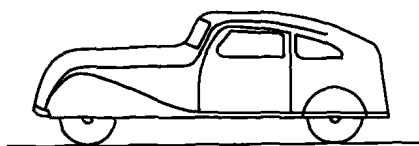


图 1-17 1938 年在戴姆勒—奔驰 170 底盘上装置的第一辆艾沃林车

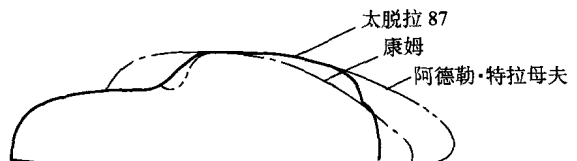


图 1-18 快背式车与两种杰瑞车的比较

2. 对内流阻力及操纵稳定性的认识

汽车空气动力学最初研究的是在静止空气中的纵向对称流动的气动阻力问题，但人们很快注意到驾驶室内通风、发动机冷却及侧风稳定性等方面的问题。

(1) 低阻汽车的侧风稳定性较差 人们认识到低阻汽车侧风稳定性较差，同时也认识到高速行驶中遇到侧风时，方向稳定性非常重要。康姆(Kamm)指出，对于大阻力的带棱角的车型，气动阻力系数随横摆角的增加变化很小；而对于流线形汽车，随着横摆角变化，阻力系数有很大变化，即低阻汽车侧风稳定性较差。

(2) 加尾翼可以减小横摆力矩，改善操纵稳定性 人们注意到侧风的危险主要来自于阵风，由于建筑物的突然出现，或者一段开阔地及菜地都会自然地产生阵风。人们发现，长尾车由于横摆力矩大而出现操纵稳定性的问题，而切尾的快背式汽车横摆力矩并不大。后来沙瓦茨基(Zawadzky)通过试验证明：加尾翼可以减小横摆力矩，改善汽车操纵稳定性。

(3) 冷却系的气流增加了阻力 随着汽车空气动力学系统研究的进展，人们认识到冷却系的气流增加了阻力，开始详细地研究冷却系的气流，诸如汽车散热器和风扇之间的相互作用、驾驶室内通风问题以及外部流场与流经驾驶室的空气流之间的关系，并研究了通过适当地调节内部流态来改善舒适性等问题。

3. 流线形车的发展

为了获得低阻汽车，人们曾试图采用“半车身”形状。图 1-19 列出了菲什利(Fishleigh)、海德(Heald)、雷和里德(Reid)的研究成果，该图为低阻车与现有车的比较。

1939 年出现了实际“半车身”设计的汽车(图 1-20)，该车的纵向中心断面由两个哥廷



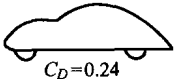
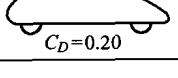
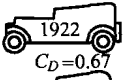
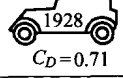
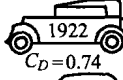
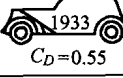
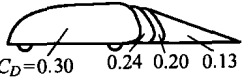

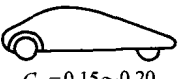
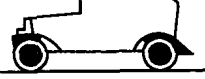
研究者	年份	实验车比例	低阻车 (优化半车身)	现有对比车型
W.T.Fishleigh	1931	1:4		
阻力系数之比 1:2.6				
R.H.Heald	1933	1:15	 $C_D=0.24$  $C_D=0.20$	 $C_D=0.67$  $C_D=0.71$  $C_D=0.74$  $C_D=0.55$
W.E.Lay	1933	1:8	 $C_D=0.30$ 0.24 0.20 0.13	 $C_D=0.61$
E.G.Reid	1935	1:5	 $C_D=0.15\sim 0.20$	 $C_D=0.61$

图 1-19 低阻车与现有车的比较

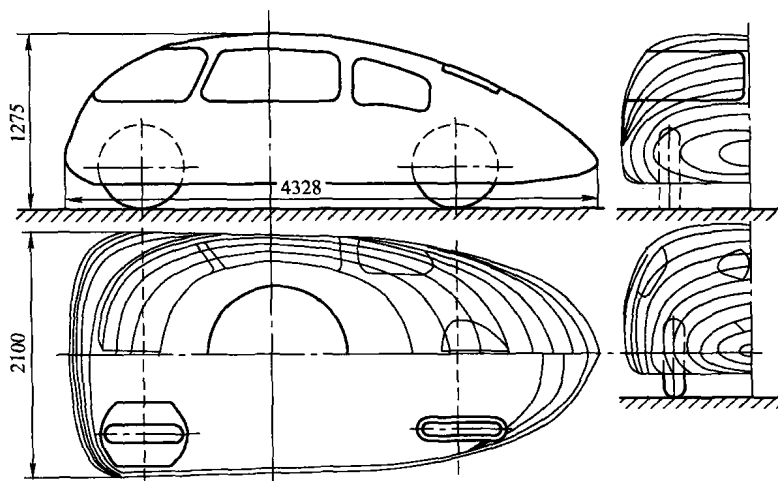


图 1-20 实际“哥廷根汽艇形半车身”汽车

根汽艇形结构构成，每个“汽艇”的气动阻力系数 $C_D = 0.125$ ；横向断面由一个旋转的半车身发展而来，使车身周围的流场在内部空间尽可能大的条件下保持连续。图 1-21 给出了这种车几种比例模型的试验结果。试验表明，当离地间隙减小时，阻力增加。曲线①、②分别为具有光滑底部的全尺寸模型和 1/5 模型试验结果。对一个底部光滑的 1/4 比例模型，试验结果为 $C_D = 0.15$ ，这与 AVA[⊙]用底部光滑的全尺寸模型所得的试验结果相当吻合。

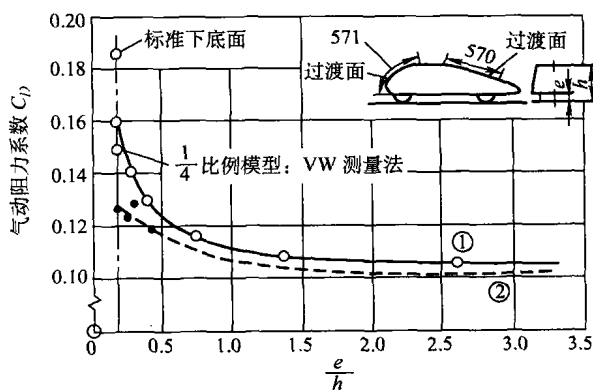


图 1-21 半车身汽车几种比例模型的试验结果
e—离地间隙 h—车高

流线形车的发展被第二次世界大战中断了。从图 1-22 可见，战后仅有的恢复研究的厂家中，雪铁龙和潘哈德 (Pon hard) ID19 车身上仍保留杰瑞车的特征，而 GS 和 CX 则与 Kamm 的切尾式的概念车有更紧密的联系。三种车型与同期的竞争者相比，都有很低的气动阻力系数。

(三) 车身细部优化阶段

汽车空气动力学发展的第三阶段为车身细部优化阶段。虽然现代流线


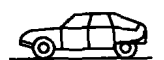

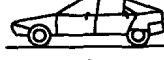
车型	生产年份	A/m^2	C_D
 ID19	1956	2.14	0.38
 GS	1970	1.77	0.37
 CX2000	1974	1.96	0.40
 BX	1982	1.89	0.33~0.34

图 1-22 第二次世界大战后恢复生产的流线形车

⊙ 1921~1922 年开始的对杰瑞车的试验持续到 1938 年，由路德维格·普朗特 (Ludwig Prandtl) 指导在哥廷根的 Aerodynamische Versuche-Anstalt (AVA) 风洞进行。