

● 国家自然科学基金资助项目

● 广东省自然科学基金资助项目

汽车空气动力学 与车身造型

黄向东 著

*Automotive
Aerodynamics
And Body Styling*
by X. D. Huang



人民交通出版社

汽车空气动力学与车身造型

黄向东 著

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

汽车空气动力学与车身造型/黄向东著. —北京: 人民交通出版社, 2000

ISBN 7-114-03690-6

I. 汽… II. 黄… III. ①汽车-空气动力学②汽车-车体-造型设计 IV. U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 62975 号

汽车空气动力学与车身造型

Qiche Kongqi Donglixue Yu Cheshen Zaoxing

黄向东 著

版式设计: 刘晓方 责任校对: 刘高彤 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7 字数: 176 千

2000 年 1 月 第 1 版

2000 年 1 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-114-03690-6

U · 02670

内 容 提 要

本书探讨汽车空气动力学及其在车身造型设计上的应用问题,全书共分九章:第一章概述汽车空气动力学的研究方法及其与车身造型的关系;第二章归纳阐述相关的流体力学和空气动力学理论基础;第三章详细分析了汽车受到的气动力及其对汽车性能的影响,并给出作者建立的汽车空气动力学新理论模型;第四章着重分析汽车周围的流场及其影响因素;第五章论述如何从空气动力学角度考虑汽车的操纵稳定性;第六章分析探讨各类汽车的理想外形,给出基于上述气动新理论模型确定车用理想基本形体、进而获得优良轿车车身造型的方法;第七章介绍汽车空气动力学实验及设施;第八章结合实例讲述车身造型设计的美学问题和车身造型设计流程;第九章涉及汽车的CAA/CAS——计算机辅助空气动力学/辅助造型问题,介绍根据上述基于气动新理论模型之造型法开发智能化车身CAA/CAS系统的思路、方法和最新成果。

除了空气动力学与工业(造型)设计方面的专业知识外,本书还涉及车身工程、人机工程学、机械工程学、美学、数值分析、人工智能、计算机应用技术及相关法规等多种学科的知识,内容新颖、资料丰富、图文并茂,较好地反映了国内外本领域研究与应用的最新进展,其中相当大一部分内容是作者在国内外从事这一领域研究工作的心得和成果总结。本书可供从事汽车车身工程的科技人员参考,也可作为高等学校有关专业研究生、本科高年级学生的教材或教学参考书。

序

汽车对人类的生活、生产方式产生着巨大的影响，伴随着汽车技术的进步，汽车空气动力学也发展成为工业空气动力学的一个重要分支。反过来，它又对汽车这种“流动建筑物”的造型乃至结构的演变与发展产生了深刻的影响。在汽车日益普及化、高速化的今天，汽车空气动力学问题的研究越发显得重要，因为它不仅直接涉及汽车的动力性、燃油经济性、乘坐舒适性、操纵稳定性与安全性等主要性能，还和人们普遍关心的环境保护问题产生了密切的关系。

目前，我国汽车工程技术总体发展水平与发达国家有一定的差距，与这种现状类似，我国汽车空气动力学研究与应用的总体水平目前也相对落后。然而，近年来的发展势头却令人瞩目，包括基础设施条件与实验分析手段不断有了增强和改善，吸引了更多的学者和科技人员关注和从事这一领域的研究，已经出现了一些具有标志性或较高水平的研究成果并被加以应用等等，这的确是件好事。近来还陆续有一些我国科技工作者撰写的相关专著出版或即将出版，这本《汽车空气动力学与车身造型》就是其中之一。该书的作者黄向东教授曾在汽车空气动力学与车身造型设计水平颇高的意大利留学，由于师从汽车空气动力学名家 A. Morelli 教授，并有机会与著名汽车空气动力学实验室和车身造型设计单位的资深同行合作交往，使作者涉足本领域时有了较高的起点。而能够完成本书的写作，则得益于作者从那时起十几年来在研究开发机构和高校从事本领域科研及教学工作的积累，特别是得益于在国家自然科学基金及广东省自然科学基金等的资助下，主持本领域科研项目时的知识创新。

这本书总结作者从事本领域研究工作的心得和成果，综合国内外资料，把汽车空气动力学和车身造型这两个本来就密不可分的问题结合起来进行探讨，把科学问题和美学问题糅在一起来描述，处理手法新颖合理，且注意把人工智能、计算机技术、流场仿真与数值分析等现代高新技术对汽车空气动力学等领域渗透的产物——计算机辅助空气动力学/辅助车身造型（CAA/CAS）等内容溶入书中，则是这本书力图反映国内外本领域研究及其应用的新进展、新方向、新概念的有益尝试。我相信，本书的出版，对汽车空气动力学与车身造型技术在我国的发展，应能起到一定的积极推动作用。

中国工程院院士 郭孔辉

1999年10月于长春

前 言

汽车空气动力学性能不仅直接地影响汽车的动力性、燃油经济性、环保性、操纵稳定性、安全性、舒适性等性能，还影响着汽车的外观款式及审美的流行趋势。在汽车尤其是轿车车身造型设计过程中力求取得最佳的空气动力学性能是非常有意义的。随着人们对汽车性能要求的不断提高，车辆的气动特性日益受到汽车制造业的重视，气动性能的优劣已成为汽车市场竞争的重要方面。

车身造型是汽车的标志，是人们用以判定汽车风格、内涵、价值的重要因素。购买汽车的顾客往往会从是否漂亮、是否好看等审美角度来判断汽车造型的好坏。但对于专业的汽车设计师来说，审美效果仅仅是他们进行车身造型设计时所要考虑的众多因素之一。总的来说，设计师们的目标是使车身造型既科学合理，又经济美观，满足人们的实用需要，这一点是自从汽车诞生以来，汽车工程界一直不懈努力追求的。

在汽车造型设计中要考虑多方面的要求，包括空气动力学、机械工程、人机工程学、安全法规、美学等要素。其中机械工程和人机工程学要素已达到相当成熟的发展阶段，对车身内外造型的要求与约束形成了较为固定的规范。从这个意义上讲，现代汽车车身造型（尤其外部造型）的演变与发展，在很大程度上受汽车空气动力学和造型美学两大变数的影响甚至支配。

然而，按照传统的学科划分界限，汽车空气动力学问题属工程应用力学的范畴，汽车（车身）造型美学问题却属工业设计的范畴。作者认为有必要跨过学科间的分界，尝试按照工程应用的实际，在本书中把两者揉在一起详细讨论。作为多技术综合载体的汽车工程，需要并已经获得了当代高新技术的强劲支撑。因

此，作者还在书中结合本人的科研成果、综合国内外资料，以较大篇幅探讨了汽车的计算机辅助空气动力学/辅助车身造型(CAA/CAS)、流场仿真与数值分析、人工智能等相关的计算机应用技术问题。作者通过上述这些做法，力图使本书的内容新颖、材料丰富，能较好地反映国内外本领域研究与应用的最新进展。

作者曾于1985~1991年期间留学意大利，那里的汽车空气动力学研究和车身造型设计水平被公认是世界一流的。都灵理工大学(Politecnico Di Torino)的导师A. Morelli教授的悉心指导和帮助，以及与著名的汽车风洞实验室、车身造型设计单位CRF、Pinfarina、Italdesign等的资深同行的合作交往，使作者在涉足本领域之初受益不浅。从那时起十几年来在研究开发机构和高校从事本领域科研及教学工作的积累，特别是在主持国家自然科学基金、广东省自然科学基金相关科研项目(如国家自然科学基金项目：汽车气动新理论模型及车身造型智能化CAS方法研究—59775043等)时的知识创新，给作者创造了斗胆撰写这本专著的基本条件。事实上，本书中相当大一部分内容就是作者在国内外从事这一领域研究工作的心得和成果总结。

中国工程院院士、吉林工业大学副校长郭孔辉教授在百忙中为本书作了序，这是对本书撰写和出版工作的热情关怀与鼓励。对此作者谨致衷心感谢。

作者还愿借本书出版的机会感谢人民交通出版社的支持，感谢华南理工大学交通学院通过论著与教材出版基金等形式所给予的帮助与支持；也一并对吴诤珪教授、孙延明副教授、王承翔博士等课题组成员以及林滨、肖超强、谢朝林等研究生在成书过程中所给予的各种帮助，致以诚挚的谢意。

由于本领域的研究与应用涉及内容广泛，发展也很快，有些新进展、新内容恐未及收入书中，加之限于作者水平，本书难免有欠妥或错误之处，恳请读者指正。

黄向东

1999年10月于广州

目 录

第一章	绪论	1
第二章	有关理论基础	7
§ 2-1	流体的属性	7
一、	连续介质的概念	7
二、	易流动性	8
三、	粘性、理想流体和粘性流体	8
四、	压缩性、可压缩和不可压缩流体	8
§ 2-2	流场及其描述法	9
§ 2-3	欧拉法的加速度表达式	11
§ 2-4	流线与迹线	13
§ 2-5	微团运动的分析, 散度, 旋度、位势 函数和梯度	16
一、	流动微团运动分析	17
二、	散度	19
三、	旋度、位势函数和梯度	20
§ 2-6	流动基本方程式	21
一、	连续性方程	21
二、	动量方程	22
三、	伯努利 (Bernoulli) 方程	25
§ 2-7	流体的涡旋运动	27
一、	涡旋运动的概念	27
二、	涡线涡面涡管; 涡通量与速度环量	28
三、	涡旋的运动学性质	30
四、	涡旋场的诱导速度、毕奥—萨瓦公式	32

§ 2-8	理想不可压缩流体的无旋绕流问题 和翼剖面理论简介	34
第三章	汽车受到的气动力及其对汽车性能的影响	40
§ 3-1	气动力的产生	40
§ 3-2	气动力和力矩的表示法	42
§ 3-3	气动阻力	45
一、	摩擦阻力	46
二、	诱导阻力	49
三、	形状阻力	53
§ 3-4	气动升力	59
§ 3-5	气动纵摇力矩	64
§ 3-6	气动侧向力、横摇和侧偏力矩	66
第四章	汽车周围的流场及其影响因素	70
§ 4-1	汽车周围的基本流场	70
§ 4-2	汽车周围流场的影响因素	73
一、	发动机罩和前风窗之间的局部气流分离	73
二、	汽车后部的气流分离和尾涡流	75
三、	汽车底部与地面之间的气流	76
四、	车轮转动对流场的影响	79
五、	内部气流的影响	81
六、	细小表面突起的影响	84
第五章	汽车稳定性的空气动力学考虑	85
§ 5-1	减小气动升力的措施	85
一、	整车总体造形对升力的影响	85
二、	某些局部造型的影响	86
三、	减小气动升力的附加装置	86
§ 5-2	改善横向风稳定性的措施	91
第六章	汽车的理想外形	94
§ 6-1	小客车(轿车)的理想外形	94
§ 6-2	工商业用车辆的理想外形	119

第七章 汽车空气动力学实验	126
§ 7-1 汽车风洞实验设施与风洞实验	126
一、汽车风洞的用途和类型	126
二、汽车空气动力学风洞试验方法	128
三、汽车风洞的结构形式	133
§ 7-2 其它空气动力学实验简介	137
第八章 车身造型设计问题	140
§ 8-1 概述	140
§ 8-2 车身造型的美学基础	143
一、产品造型的形式美法则	144
二、视错觉利用与矫正	154
§ 8-3 车身造型设计一般流程	158
一、造型构思	158
二、造型效果图	160
三、缩比模型	161
四、胶带图	163
五、全尺寸(油泥)模型	164
六、车身表面线图	168
第九章 汽车的计算机辅助空气动力学/辅助造型	170
§ 9-1 汽车的计算机辅助空气动力学	170
一、汽车 CAA 一般方法简介	170
二、汽车 CAA 的应用实例	177
§ 9-2 计算机辅助车身造型	181
一、理想基本形体形状的影响因素	184
二、人工智能技术	186
三、ICAS 系统总体设计	189
附录: 完整的 N—S 方程及补充湍流模型简介	201
主要参考文献	207

第一章 绪 论

空气动力学 (Aerodynamics) 是研究物体在与周围空气作相对运动时两者之间相互作用力的关系及运动规律的科学, 它属于流体力学的一个重要部分。长期以来, 空气动力学成果的应用多侧重于航空及气象领域, 特别是在航空领域内这门学科取得了巨大进展, 给汽车或路面车辆的空气动力学 (Automotive Aerodynamics/Road Vehicle Aerodynamics) 研究提供了借鉴。然而进一步的研究表明, 汽车或车辆的空气动力学问题从理论到实际两个方面都与航空等问题有本质的区别, 汽车空气动力学已逐步发展成为空气动力学的一个独立分支。

汽车空气动力学的研究方法和物理学中的其它领域一样, 可分为理论、计算和实验三种。理论研究方法通过抓住所分析问题的主要影响因素, 抽象出合理的简化理论模型, 并根据已总结出来的普遍物理定律 (如牛顿定律、热力学定律等) 和有关介质 (空气) 性质的实验公式来建立描述介质运动规律的积分或微分方程。然后利用各种数学工具及相应的初始、边界条件准确或近似地解出方程组, 通过对解加以分析来揭示由解所表示出来的各种物理量的变化规律 (包括将它与实验或观察资料对照, 确定解的准确度和适用范围)。由于数学发展水平的局限, 理论研究往往只能建立较为简单的近似模型, 无法完全满足研究更复杂更符合实际的气流的要求。于是近年来出现了依托快速电子计算机进行有效的数值计算的方法 (CFD - Computational Fluid Dynamics, 其中包括有限元法、有限差分法等等), 它属于汽车的计算机辅助空气动力学 (CAA - Computer Aided Aerodynamics) 的范畴, 并已成为与理论分析和实验并列或具有同等重要性的研究方法。其

优点是能够用来预测或解决一些理论及实验无法处理的复杂流动问题，能取代部分实验环节且省时间省工。但它要求事前对问题的物理特性有足够的了解，从而能够提炼出较精确的数学方程及相应的初始、边界条件等，这些都离不开实验和理论方法的支持，此外数值方法通常无法直接反映同类问题中有普遍指导意义的结论或规律。实验研究方法在空气动力学研究中占有重要地位（如风洞试验），它使人们能在与所研究问题相同或相近条件下进行观测，提供建立运动规律及理论模型的依据，检验理论或计算结果的准确性、可靠性和适用范围，其作用是不可替代的。但实验方法受限于实验手段、设备和经费等物质条件，甚至有些问题尚无法在实验室中进行研究。总之，理论、数值计算和实验三种方法相互促进，彼此影响，取长补短，从而推动了汽车空气动力学的不断发展。理论、实验和数值计算三种方法及其有关的重要论点和结果在本书中均涉及到了。

考虑到汽车的实际运行速度，汽车空气动力学属于低速空气动力学（相对流速远低于音速）范畴，但汽车与低速飞机等自由飞行体不同，是在地面上运动的，因此航空低速空气动力学的许多研究思路、方法和结论都不可直接套用。汽车空气动力学是为汽车产品设计服务的，其主要实用任务可以归纳成下列几个方面：

研究阻碍汽车前进的气动力分量，即空气阻力或风阻，寻求气动阻力尽量小并能同时满足各种其它性能要求的合理汽车外形，以利于提高汽车的动力性、燃油经济性和环保性（节能和减少排放污染，后者在当前尤为重要）。

研究气动力的垂直分量（升力）以及侧向分量和各种气动力矩，寻求改善汽车操纵性和行驶稳定性的有效措施，以利于提高汽车的安全性能。

研究汽车发动机舱和驾驶室的气流组织，提高散热效率及改善室内乘坐舒适性，同时也进一步降低行驶气动阻力。

研究车外气流对车内噪声的影响，寻求降低气动噪声的措

施，以利于提高汽车的乘坐舒适性。

在顾及到其它几个方面的情况下，本书侧重于介绍头两个方面的内容，因为它们不仅直接涉及汽车的环保与安全问题，也和汽车（尤其是轿车）车身的造型设计有着最密不可分的关系。

由于汽车设计制造技术的进步和对汽车性能要求的日趋苛刻，汽车的气动性能已成为汽车车身设计所必须考虑的重要问题，这反过来也推动了汽车空气动力学研究的长足发展。试看一例：

车用燃油单位质量的能量约为 12kWh/kg 、单位体积的能量约为 10kWh/L ，一般汽车是通过内燃机及传动系统等，把燃油的热化学能转化成为驱动车轮上的机械能的。然而由于热机固有效率不够高和其它一些原因，这种转化的总效率目前仍相当低。根据通用汽车公司的统计数据^[20]，现代汽车按美国环保署（EPA）城市/高速公路混合循环的平均能耗分解如图 1-1 所示，由图可见真正转化到车轮上用以克服行驶阻力的只占燃料总能量

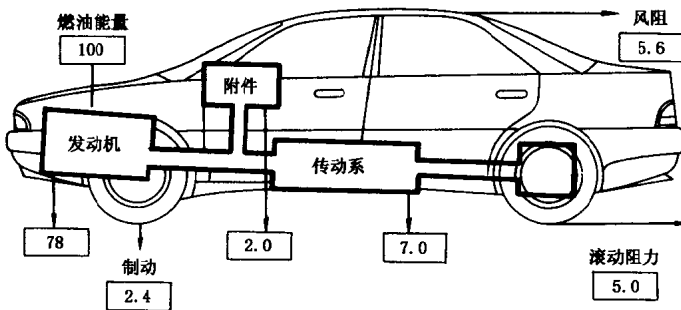


图 1-1 EPA 混合循环时的能耗分解

的 10% 多一点，其中坡道、惯性阻力能耗考虑到上下坡和加减速部分正负相抵（其余部分计入制动能耗）之外，驱动轮有效机械能约 53% 被用来克服风阻、47% 被用来克服滚动阻力。表 1-1 是

注 [20]：指书后参考文献顺序号，全书下同。

(a)、(b)、(c) 三种轿车在 EPA 城市/高速公路混合循环下的情况对比：(a) 是现行某气动性能较好的常规轿车；(b) 是图 1-2 所示指标先进的 GM - Impact 电动概念车；(c) 是预期可能达到更高指标的未来轿车。三种车的质量 M 和迎风面积 A 相同，风阻系数 C_x 、滚动阻力系数 f 不同。表中列出了对应于 11.99km 城市循环和 16.5km 高速公路循环的能耗，表中巡航（续驶）里程则是按给定车轮上的机械能为 10kWh 来计算的，约为现行电动汽车的实际数量级。

三种轿车在 EPA 城市/高速公路混合循环下的情况对比

表 1-1

车 型 $M = 1000\text{kg}$, $A = 2\text{m}^2$	(a)现行常规轿车 $C_x = 0.31$, $f = 0.015$				(b)先进轿车 $C_x = 0.19$, $f = 0.0045$				(c)未来轿车 $C_x = 0.13$, $f = 0.004$			
	城市	%	高速	%	城市	%	高速	%	城市	%	高速	%
滚动阻力能耗	0.49	38.7	0.67	39	0.15	17	0.2	20	0.13	16.4	0.18	21.8
风阻能耗	0.27	21.4	0.88	51	0.17	19.3	0.54	53	0.11	14.3	0.37	44.9
加速动能(惯性能)	0.51	39.9	0.17	10	0.55	63.7	0.27	27	0.55	69.3	0.28	33.3
合计	1.27	100	1.72	100	0.87	100	1.01	100	0.79	100	0.83	100
续航里程(km)	94.6		95.5		138.7		163.1		200		204.7	

由表可见，采取降低风阻及滚动阻力的措施后，反映汽车动力性、经济性的动能及其所占比重、整车巡航续驶里程等都大幅增加，所需的总能量也下降了。

上述分析表明，第一，汽车的大量使用产生了大量的无效能源消耗和随之而来的严重排放污染，需要研究和采取各种对策进行改善；第二，降低风阻及滚动阻力不仅是综合地提高整车动力性、经济性的主要途径，也是减少排放的有效手段之一。

车身造型设计的目的是使汽车能尽量完满地体现它的物质功能和精神功能，充分满足人们在实用和审美两方面的需求。造型款式不仅本身是评价汽车产品好坏的重要指标之一，还和汽车性能、质量、价格等方面的指标有密切的相关性，因此造型是汽车

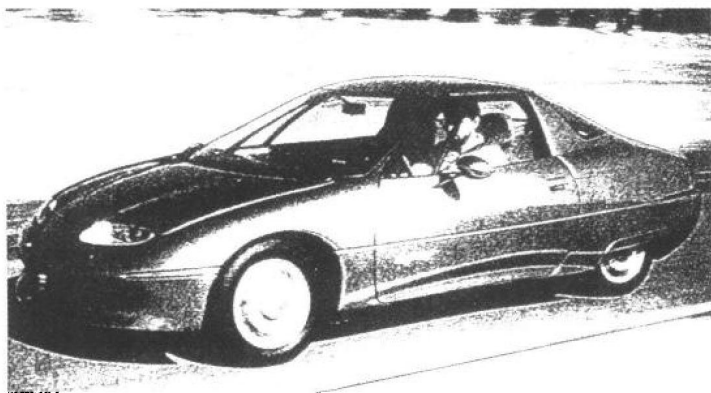


图 1-2 GM-Impact 电动概念车

工业产品方案选择的决策性步骤。可以毫不夸张地认为造型设计已成为决定产品命运的一个关键，是提升产品商业价值、提高产品竞争力的最有力手段之一。随着人们物质、文化生活水平的提高，人们对汽车造型的要求也越来越高。这样，造型设计就成为每个设计人员必须学习和掌握的一门新学科。它对研制新产品，革新老产品，开拓产品的市场空间具有现实和深远的意义。

汽车车身造型的确定主要受机械工程学、人机工程学、空气动力学、美学以及与其相联系的商品学等要素的制约。事实上，机械工程学、人机工程学要素已达到相当成熟的发展阶段，对车身内、外造型的要求与约束已形成了较为固定的规范。从这个意义上讲，现代汽车车身造型（尤其是车身外部几何形态）的演变与发展，在很大程度上受汽车空气动力学和造型美学两大因素发展水平的影响甚至支配。目前其发展趋势的主流，是在不断追求气动优化（涵环保与安全优化）的同时追求个性化、多样化，实现技术美、性能美与形式美的协调统一。这就要求现代车身造型设计师至少应在汽车空气动力学和造型美学方面有较深厚的功底。此外，现代科技，特别是现代计算机辅助和人工智能技术等的发展，已经并将继续对汽车造型设计方法产生深刻的影响，也

要求现代车身造型设计师了解并掌握相关知识，不断拓宽知识面。

尽管目前我国在汽车空气动力学和车身造型领域的研究和应用比起工业发达国家总体上尚有相当大的差距，但可以预计，随着我国汽车特别是轿车工业的迅速崛起，我们在此领域一定能快步赶上世界先进水平，并带动相关领域（如船舶、机车造型设计）的快速发展。