

汽车空气动力学

杜广生 编著



中国标准出版社

汽车空气动力学

● 杜广生 编著

中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

汽车空气动力学/杜广生编著. -北京:中国标准出版社,1999.8
ISBN 7-5066-1859-1

I. 汽… II. 杜… III. 汽车-空气动力学 IV. U461.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 11617 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{4}$ 字数 204 千字

1999 年 9 月第一版 1999 年 9 月第一次印刷

*

印数 1-800 定价 26.00 元



作者简介

杜广生 (Du Guangsheng) 1955年10月生, 山东汶上人。1982年毕业于山东工学院机械系。山东工业大学动力工程系副教授、硕士生导师、教研室副主任、国家教育部高校工科力学课程教学指导委员会委员。从事流体力学、汽车空气动力学的教学和科研工作。近年主持或参与完成了“涡流强化换热元件及机理的研究”、“国产厢式货车气动减阻节能降耗的研究”等课题, 其中两项达到国际先进水平或国内领先水平。发表论文25篇, 参编“九五”国家级重点教材《工程流体力学》, 获得国家专利1项。

前 言

汽车空气动力学是通过研究空气绕流汽车时的压强场和速度场来分析气动力对汽车性能的影响、优化汽车造型的一门学科。它研究的主要内容是:空气动力和造型之间的关系、稳定性、冷却通风、灰尘结垢和气动噪声等。早在本世纪 20 年代,欧美国家就开展了汽车空气动力学的研究工作,随着汽车工业水平的提高和逐步发展完善,形成了一门独立的学科。汽车气动外形的演变,反映了各个不同时期的汽车空气动力学的发展水平。其研究成果的不断应用,推动了各个时期汽车工业的发展。

汽车空气动力学的研究工作,在我国起步较晚。由于前些年我国高等级公路通车里程少;汽车工业水平低,交通设施不完善,实用车速较低,作用在汽车上的气动力较小;汽车空气动力学的研究工作并没有引起人们的足够重视。近年来随着我国国民经济的高速发展,汽车行业不断引进具有国际先进水平的新设备、新技术,使我国汽车工业水平有了很大的提高,同时高速公路和高等级公路不断建成和投入使用,实用车速不断提高,作用在汽车上的空气动力对汽车性能的影响已经达到了必须进行控制的程度。我国汽车空气动力学的研究工作就是在此背景下开展起来的,并取得了许多高水平的研究成果,推动了我国汽车工业的发展。

本书是作者在为山东工业大学车辆工程等专业的学生开设《汽车空气动力学》课程讲稿的基础上撰写而成的。书中收入了国内外汽车空气动力学方面的许多新的研究成果,也包含作者多年的研究成果。为了在有限的篇幅内向读者提供尽可能多的应用知识,尽量压缩了理论性内容的篇幅,而着重应用性内容的阐述。本书共分八章,分别介绍了小轿车、公共汽车和货车的气动造型,讨论了气动力对稳定性的影响,对汽车的污染和气动噪声作了简述,并对汽车风洞试验中的问题进

行了分析论述。本书可作为工科院校机械类专业《汽车空气动力学》课程教学用书,亦可作为从事汽车设计、制造、使用和汽车爱好者的阅读书籍。

本书的编写曾得到山东工业大学流体力学教研室多位教授的指导,并提出了许多宝贵意见;研究生王志同学为本书的插图处理作了大量工作,在此谨表示感谢。

由于水平所限,谬误之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者

1999.3.1

目 录

第一章 绪论	1
第一节 汽车空气动力学的研究内容	1
第二节 汽车空气动力学的发展和汽车外形的演变	3
第二章 空气动力学基本原理	21
第一节 理想流体和不可压缩流体	21
第二节 定常流动 非定常流动 流线迹线和流谱	22
第三节 流体的连续性方程和伯努里方程	23
第四节 边界层及其分离现象	25
第五节 升力和阻力	29
第六节 摩擦阻力和压差阻力	30
第七节 诱导阻力	34
第八节 作用在汽车上气动力和力矩	35
第三章 空气动力对汽车性能的影响	38
第一节 牵引力必须克服的各种阻力	38
第二节 发动机功率和车速的关系	40
第三节 气动阻力和最大车速的关系	41
第四节 气动阻力对汽车加速度的影响	42
第五节 气动阻力对燃油消耗率的影响	43
第四章 小轿车 运动汽车 赛车的气动造型	47
第一节 小轿车周围的流谱和压强分布	47
第二节 小轿车气动阻力的构成	51
第三节 小轿车气动外形的设计	57

第四节	运动车和赛车的气动造型	99
第五章	公共汽车和货车的气动造型	109
第一节	公共汽车的气动造型	109
第二节	货车的气动造型	115
第六章	汽车表面尘土污染的治理和气动噪声控制	144
第一节	汽车表面的尘土污染	144
第二节	汽车的气动噪声与控制	152
第七章	气动力对汽车稳定性的影响	160
第一节	汽车稳定性的概念及影响稳定性的各种力和力矩	160
第二节	汽车横摆运动的稳态方程	168
第三节	汽车的临界速度和静态系数	170
第四节	计及侧倾影响的横摆运动方程	174
第五节	汽车的动态稳定性和动态运动方程	179
第八章	汽车风洞试验	185
第一节	汽车风洞试验的重要性和主要试验内容	185
第二节	风洞构造及其分类	191
第三节	气动力天平和试验地板	198
第四节	压强测量和流场显示	206
第五节	汽车风洞试验的几个技术问题	211
第六节	汽车模型	218

第一章 绪 论

第一节 汽车空气动力学的研究内容

汽车空气动力学是用流体力学的基本定律、基本原理和基本方法,分析气流绕流汽车时的速度场、压强场,来研究作用在汽车上的气动力和气动力矩及其对汽车性能和造型影响的一门学科。是工程流体力学的一个新的分支,也是汽车工程的一个重要领域。

汽车空气动力学研究的重要手段是风洞试验,在原理、方法上和航空空气动力学、建筑物空气动力学风洞试验有很多相同和相似之处。例如在研究空气动力、压强场和流场显示方面有非常相近之处。但是汽车是在地面上行驶的钝头物体,气动特性介于锐边的平板和流线体之间,所以在雷诺数、马赫数和地面效应的模拟等方面有其特殊性。由于汽车品质,如通风、冷却和减少污染等方面的要求,对于汽车表面流场的显示要比航空器更为重要。

汽车空气动力学所研究的问题通常有以下几个方面:

一 关于汽车的气动力和气动力矩

作用在汽车上的气动力和气动力矩与汽车的性能密切相关,汽车的气动阻力直接影响着汽车的加速性和燃油消耗率等经济性和动力性方面的指标。气动侧向力、升力和横摆力矩直接影响着汽车的稳定性和直线行驶能力,影响汽车的操纵性能,和行驶安全密切相关。由于各种汽车的用途不同,它们对各个气动力和气动力矩分量的考虑也有所不同。因而对气动力和气动力矩的研究就成了汽车空气动力学研究的重要内容。

二 关于汽车周围的流谱

研究汽车的气动造型问题,光知道作用在汽车上的气动力和气动力矩以及压强分布还是不够的,因为它们与流过汽车表面气流的流动过程直接相关。所以通常还要辅以汽车流谱的研究,这样才能够了解

汽车表面气流的流动机制,了解气流的分离和尾流的情况,以利于对气动现象与机理的分析和对汽车外形作进一步的改进。

汽车表面的流动情况可在风洞中用在汽车表面粘贴丝线的方法进行观察,也可以用速度测量探针测量出各点的速度,进行定量的分析。但汽车整体的流谱通常在烟风洞中进行观察,这种风洞按一定要求释放烟流,由烟流流过汽车或模型的过程,可以清晰地观察到气流流过汽车的完整的图象。如图 1-1 所示。

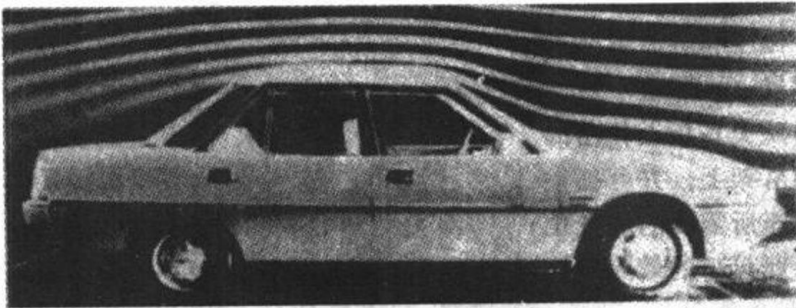


图 1-1 烟风洞中得到的流谱

三 关于内部设备的冷却

需要进行冷却的设备主要有发动机和制动装置,这些装置都要由引入的外来空气进行冷却,发动机冷却气流的引入如图 1-2 所示。冷却效果在一定程度上决定于气流的流动过程,因而内部设备的冷却也是汽车空气动力学的一个重要内容。这种试验对流场的品质要求不高,但对空气的湿度和温度必须精确地加以模拟,这类试验往往在气候风洞中进行。

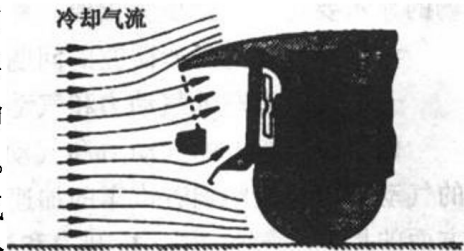


图 1-2 发动机的冷却气流

四 关于散热通风和空调

汽车是由人驾驶的运输工具,为了乘员的舒适性必须设置散热通风系统和空调设备。为实现客舱内的通风,往往在汽车前部压强较高

的部位开设进气孔,在汽车后部或侧面压强较低的部位开设排气孔。而这些孔的形状和具体的开设部位会受到气流绕流汽车时的速度场、压强场的制约,也是汽车空气动力学的一个重要研究内容。这类试验对流场的要求一般要比内部设备冷却试验高一些,同时也要很好地模拟空气的温度、湿度和太阳的照射条件。这类试验也必须在能够模拟气候条件的风洞中进行。

汽车表面的尘土污染、气动噪声、刮雨器上浮等问题,也与气流在汽车表面的流动过程有关,也是汽车空气动力学的重要研究内容。近几年兴起的汽车表面流场的数值计算也是汽车空气动力学的一个重要研究领域。

第二节 汽车空气动力学的发展和汽车外形的演变

在汽车诞生后 100 多年的时间里,汽车的外形经历了复杂的变化,每一时期汽车造型的进步都体现了空气动力学的影响。

一 汽车空气动力学的发展

空气动力学研究物体在空气中运动时物体和空气之间的相互作用的关系。人们总是误认为空气动力学及其研究成果的应用只局限于飞机和航天领域。实际上早在汽车诞生不久,人们就开始研究汽车的空气动力问题。赛车从 1900 年、实用车从 1910 年就已开始考虑了空气阻力问题。为了减小空气阻力,首先采用的方法是降低车的高度,减小迎风面积,1900 年的车体高度与马车同高,为 2.7 m;1910 年降低到 2.4 m;1920 年达到 1.9 m。1922 年德国策佩林工厂在其大风洞中就做了关于车身外形对气动阻力影响的研究。后来卡姆领导的科学工作者还进行了气动力对汽车稳定性和直线行驶能力影响的研究。1930 年美国的克莱斯勒公司对汽车空气动力学的问题也曾做过一些研究;1934 年美国的雷依教授在风洞中用模型测量了各种车体的阻力,对汽车外形的设计产生了重大影响,这方面进一步的研究工作是 1950 年美国福特公司开始进行的。1956 年美国对汽车外形从其功能发展的观点出发进行了系统的研究。

70年代以来,汽车空气动力学有了较大的发展,各大汽车公司不惜巨资,都相继建立了自己的汽车专业风洞,进行了较全面的汽车空气动力性能的试验,取得了许多高水平的研究成果,开发出了许多空气动力性能优越的小轿车,并且在商用汽车外形的研究方面也取得了许多卓有成效的成果,使汽车空气动力学的研究进入了一个新的发展阶段。

由上述可知,人们很早就开展了汽车空气动力学的研究工作,取得了一些应用性成果,推动了汽车工业的发展。但是在很长一段时间里,汽车空气动力学问题的研究,还处在一个较低的水平上,只是近十几年其研究工作才进入了一个较成熟的阶段。究其原因可归纳为以下三点:

1. 汽车实用行驶速度日益提高

在这一时期,汽车速度有了显著的提高,特别是高速公路的发展给实用车速的提高创造了条件,已由每小时的几十公里提高到目前的一百几十公里,如图 1-3 所示。在此速度下气动阻力已超过汽车总阻力的 50%,随着车速的提高,气动阻力所占的百分比还会进一步增大,并且随着车速的提高,其它气动力分量也有增加的趋势,这些因素在很大程度上影响着汽车的性能,如经济性、动力性和稳定性。因而实用车速的提高是这一时期汽车空气动力学发展的一个重要因素。

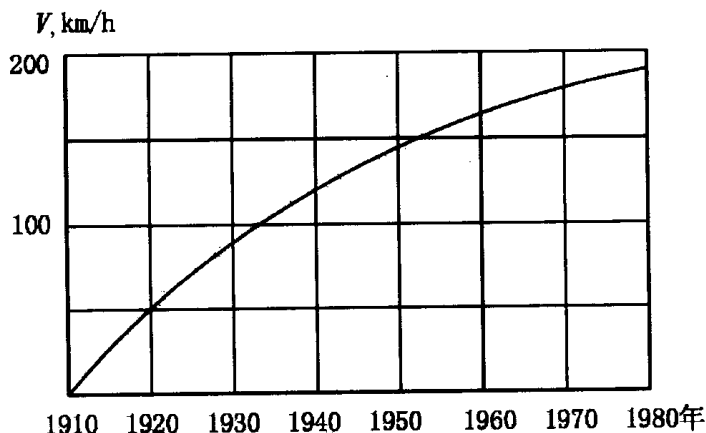


图 1-3 轿车实用车速随年代的发展

2. 石油价格暴涨

世界性的石油危机使石油价格一度暴涨和严重短缺,促使各汽车厂家和汽车拥有者更加注重汽车的燃料经济性,因而减小气动阻力提高汽车的燃料经济性成了汽车空气动力学研究的重要课题。这一因素也极大地影响着这一时期汽车空气动力学的发展,使当今小轿车的平均气动阻力系数达到 0.35 的水平。在不久的将来小轿车的气动阻力系数可望达到 0.20 的水平。研究指出:如能使气动阻力系数下降 20%~25%,汽车的燃油耗可减少 8%~20%,采用其它措施都很难达到如此好的效果。

3. 市场竞争

随着汽车市场竞争的日趋激烈,各汽车厂家都更加注重汽车的预研性研究,以期能设计出性能更加优秀的汽车来扩大汽车的销售量,从而也促进了汽车空气动力学的发展。

由上述知,正是由于人们长期不断地努力,才使汽车空气动力学的研究工作有了巨大的进步,不仅气动阻力系数不断下降,汽车的各项空气动力学指标都有了较大的改善。图 1-4 为小轿车气动阻力系数随年代的变化情况。1910 年前后开始,由于汽车的挡泥板和大灯融为一体、使大灯隐入车体、汽车外形逐渐采用流线型设计,使气动阻力系数逐步由 0.9 下降到 0.47。1950 年前后由于汽车外形由三角形变为四边形,使阻力系数略有回升,经过不断改进,1974 年前后气动阻力系数又降为 0.46。1972 年提出了汽车外形的优化设计思想,在不改变汽车总布局的情况下,对汽车外形作局部优化设计,减小气流分离的可能性,改善气动性能,使小轿车的平均气动阻力系数到 1981 年达到 0.42 的水平。近几年随着汽车空气动力学研究工作的不断深入,已使小轿车的平均气动阻力系数降低到 0.35 的水平。

在长期的研究过程中,人们不仅注意侧滑角为零时的气动性能,而且对汽车抗侧偏的灵敏性也做了大量的工作,取得了可喜的成果,设计出了横摆角在 $\pm 10^\circ$ 范围内阻力增量都非常小的车型,使气动性能大为改善。如:Audi100 小轿车,由 Audi100 II 型改进为 Audi100 III 型后,气动阻力系数由 0.42 降为 0.30,有横摆角时气动特性也有所改善,并且使

气动噪声也有了明显地降低。

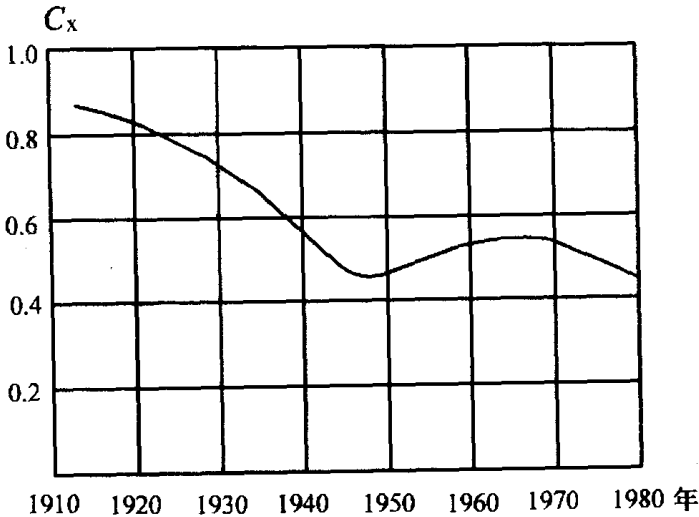


图 1-4 轿车气动阻力系数随年代的变化

在我国汽车空气动力学的研究工作起步较晚。由于一个时期以来我国汽车工业水平较低,交通设施落后,实用车速较低,汽车的空气动力性能的重要性还没有达到必须进行控制的程度,因而没有得到人们的足够重视。但是进入 80 年代以来,随着改革开放的步伐加快,汽车行业不断引进具有国际先进水平的新技术,使汽车工业水平有了很大的提高,高速公路和高等级公路不断建成投入使用,公路状况有了显著的改善,使实用车速大大提高;加之一个时期以来我国铁路设施较为陈旧,通车里程少,客运和货运不得不在很大程度上依赖于汽车的公路运输,致使汽车的耗油量占全国耗油总量的 80% 以上。因此汽车的减阻节能问题日益突出。我国汽车空气动力学的研究工作就是在此背景下开展起来的,现已形成一支数量可观的汽车空气动力学工作者队伍。北京空气动力学研究所和长春汽车研究所合作在北京空气动力学研究所改建了汽车试验用风洞,并开展了研究工作,中国空气动力研究与发展中心在航空风洞中对实车风洞试验技术进行了系统的研究,山东工业大学和江苏理工大学、同济大学都曾在小型风洞中用模型对某些车

型的空气动力特性进行了研究,均取得了较好的效果,为汽车空气动力学的发展做出了贡献。随着广大科技工作者的不断努力,将会取得更加丰硕的成果,为本学科的发展做出更大的贡献。

汽车空气动力学经过 70 多年的发展和完善,逐步为人们所认识,从而形成了一门独立的学科。这一学科的建立有赖于流体力学和空气动力学的基本原理和定律,同时也在很大程度上受益于航空空气动力学。风洞试验是进行汽车空气动力学研究的重要手段,但是飞行器的试验和汽车试验存在很大的差别,因此汽车空气动力学又具有它自身的特殊性,飞行器多为流线型物体,在大气中自由飞行,而汽车外形接近于钝形物体,在地面上运动,汽车周围的流场受到地面的影响,同时车轮的转动还会对车身的空气动力产生干扰,另外车速的改变和行驶状态的变化还要影响汽车的直线行驶能力和汽车的稳定性,汽车的风洞试验技术和飞行器的试验存在较大的差别,这些问题都需要进行深入的研究。

二 汽车外形的设计要素和汽车外形的演变

要设计出一个理想的汽车外形并不是一件容易的事情,目前汽车之所以呈现出丰富多彩的外形,是众多汽车设计师们艰苦卓绝努力的结果,各种汽车的外形虽然不同,但设计要素却是共同的。

1. 汽车外形的设计要素

汽车外形的设计要满足以下几个方面的要求:

(1) 机械工程学要素

要使汽车具有行驶机能,必须安装发动机、变速器、车轮、制动器、散热器等装置。要使汽车更好地行驶,把这些装置安装在车体的哪个部位,是值得很好地研究的问题,绝不能随心所欲的处置。这些设计决定之后,可根据发动机、变速器的大小和驱动形式大致确定车身骨架。如果大量生产,则强调降低成本,车身要易于制造,便于维修。上述这些都属于机械工程学的范畴。

(2) 人体工程学要素

汽车是供人乘用的工具,所以汽车车身的设计必须考虑乘员的舒适性和安全性,首先应确保乘员的乘坐空间,要合理设计汽车的长、宽、

高尺度,车门的位置和尺度以及开关形式等。以保证乘坐舒适、驾驶方便,并尽量扩大乘员的视野,同时还要考虑上下方便,减少振动和噪声。这些都是设计车身外形时与人体工程学有关的内容。

(3) 流体力学要素

在确定汽车外形时,来自外部的制约条件——流体力学要素。汽车高速行驶时,气流和汽车发生相对运动,产生和车速平方成正比的气动阻力,从而影响汽车的动力性和经济性,增加燃油消耗。除阻力外,气动升力和横摆力矩将影响汽车行驶的稳定性的,因此车身外形直接影响汽车的性能,这些问题的解决必须依靠流体力学理论。

(4) 商品学要素

商品学要素对汽车外形也有一定的影响,因为汽车也是一种商品,各汽车厂家总希望用汽车外形取媚于顾客,刺激购买欲来扩大销售,提高市场的占有率。但是人们的爱好和美学观点是多变的,如果汽车外形的设计只追求视觉和展览效果,而忽略前述的三个要素,终不能长久而被淘汰。此外由于各国风土人情和传统的差异,一个国家和一个厂家的汽车都有各自的风格。

在上述要素中,人体工程要素和机械工程要素已经达到相当完善的阶段。商品学要素因时、因地而异。就目前的情况看,流体力学要素还有更大的发展余地。要使上述要素完美地体现在一辆汽车上是相当困难的,有时它们之间相互矛盾,相互制约,如图 1-5 所示。图 1-5 的各圆分别是上述要素的具体体现指标,各圆之间的连线表示相互抵触的指标。由图可知,要做到诸指示之间完美的统一相当困难。尽管困难很多,但自汽车问世以来,人们就开始不间断地追求机能上的理想造型,在汽车技术尚未成熟的初期,只能把机械工程要素作为重点,使汽车能行驶即可,随着技术的进步,就开始尝试把以上要素统一于汽车之上,因而就出现了不同时期不同的汽车外形。以下分小轿车和商用汽车两种类型加以论述。

2. 汽车外形的演变

(1) 小轿车气动外形的演变

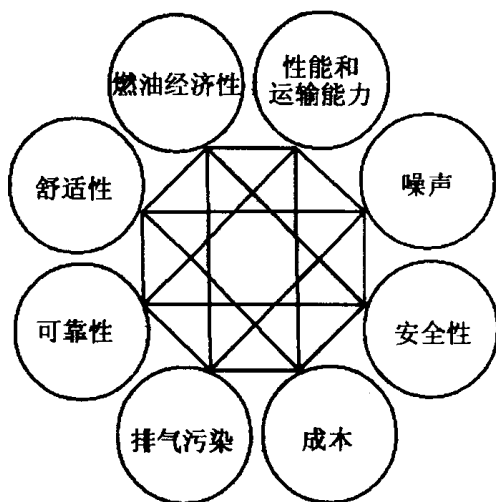


图 1-5 各指标间的关系

德国工程师高特立勃·戴姆勒于 1886 年制造了世界上第一辆汽车,该车是后置发动机、后轮驱动的四轮车,后轮比前轮约大一倍,转向杆转向,时速 10 km 左右。1905 年的 B 型福特车将发动机前移,没有后门与现在的敞篷小汽车相似,同年制造的大型 C 型福特车,设有风挡玻璃,采用双缸发动机,时速为 50~60 km。1908 年汽车上装上了四缸发动机,车速达到 80 km/h,这样大的风速已为人所不能接受,四人的小轿车都装上了车篷。直到这时汽车外形还未脱离马车的造型,都是技术尚未成熟的产物,其外形设计还很少考虑流体力学要素。

从小轿车外形演变的历史看,真正确立汽车的基本造型并进行大量生产是从 1915 年开始的,从那时起可将小轿车外形的演变分为六种类型。

① 厢型汽车

如上所述最初生产的汽车并未脱离马车的造型,1915 年生产的福特 T 型车,才真正确立了汽车的基本外形——厢型汽车。这在轿车外形演变的历史中具有重大的意义。这种车的外形从整体上看是四方形的,所以称为厢型汽车,厢型汽车的典型外形如图 1-6 所示。