



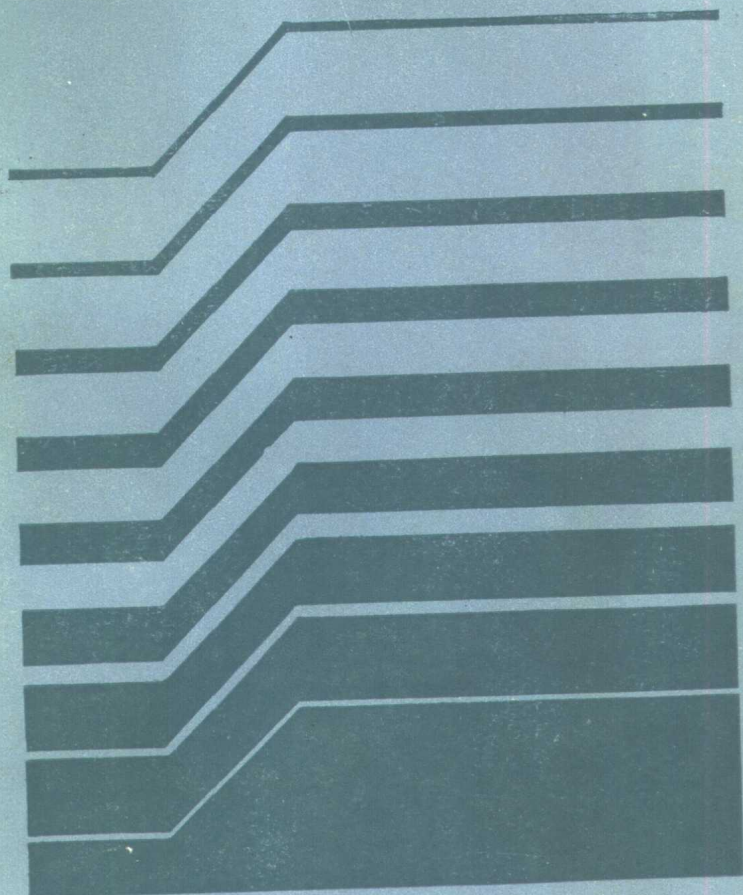
[美]

M. M. 凯墨尔

J. A 沃尔夫 编

陈砺志 译

# 现代汽车结构分析



人民交通出版社

# 现代汽车结构分析

Xiandai Qiche Jiegou Fenxi

〔美〕 M.M.凯墨尔 J.A.沃尔夫 编

陈 砺 志 译

人民交通出版社

383200

## 现代汽车结构分析

[美] M.M.凯墨尔 J.A.沃尔夫 编

陈砺志 译

责任编辑 周忠校

责任校对: 梁秀清

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经营

人民交通出版社印刷厂印

开本:  $850 \times 1168$  1/32 印张: 13.375 字数: 330千

1987年9月 第1版

1987年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—11,350册 定价: 3.40元

## 内 容 提 要

本书的主要内容包括：汽车及其结构的历史回顾、建立汽车结构设计的准则、矩阵结构分析导论、汽车结构有限元模型的建立、汽车结构系统的振动模型、汽车结构模型的求解方法、设计的刚度与变形分析、设计的应力与疲劳分析、碰撞模拟、塑性变形分析以及采用有限元法的结构-声学分析和结构设计的优化等，可供从事汽车设计和结构分析研究的工程技术人员以及有关大专院校的师生借鉴。

## 序

现代汽车车身的设计所必须满足的一系列约束和需要达到的许多预期的目标，也许比人类设计的其他任何结构所要求的都多。在这些约束和目标中有：

1. 车身结构必须能够承受在其整个使用寿命期间可能遇到的所有静力与动力负荷。

2. 它必须提供一个舒适惬意的车内空间、满意的行驶平顺性与操纵性以及対大自然影响的抵御能力。

3. 它必须提供对车内外噪音源的隔音。

4. 车身的布置必须保证驾驶员和乘客有适当的可见度。

5. 它必须是重量轻的，以使其驱动所需的能量为最小。

6. 它必须具有低空气动力阻力的外形。

7. 它必须保证在所有可能发生的事故（包括导致车辆毁坏而无法继续使用的事件）中提供对乘员的保护。

8. 结构所用的材料必须是来源丰富、价格低廉的。整体设计和所用的材料必须能够以高的速率（每天数以万计）制造和装配。

9. 车身结构必须在汽车的整个使用期间包括热、冷和腐蚀等各种环境中满足其所有要求。

10. 在其有用寿命的终了，其材料必须能够在新的车身结构或别的产品制造中再循环和再使用。

11. 最后，其总价格必须足够低，以使千百万人有力购买。

尽管这些准则的大多数只有在实车试验和评价后才能确定其实际效果，设计者所采用的结构分析和优化都是他们获得成功的关键。为此，汽车设计师从土木、机械和航空工程师，最近甚至从航天部门借用了许多中加进了自己的东西，并且随着现代高速计算机全部功能的应用，将整套方法转用到汽车设计问题中。

本书阐明了汽车结构分析演变至今所蕴涵的哲理和方法论。  
对这一专题的这个独特的综合处理定将受到所有汽车工程师和设计师的热切欢迎。

美国通用汽车公司研究实验室

主管副主任 Paul F. Chenea

# 前 言

1970年以前，汽车结构设计师一直面临着采用传统方法所不能解决的问题。由于对结构的技术要求增加了，多样化了，如果仍采用实车试验来确定需要重新设计的部位，在产品发展周期中就几乎没有富余的时间去考虑代替方案。当时已有的分析工具仅限于各种零部件的材料强度计算。结构的整体性状只有在制作出汽车原型并进行试验之后才能预测。汽车工业已经迫切需要一种新的结构设计方法。

作为通用汽车公司研究实验室的工程师，作者着手研究和应用可在制作原型之前全面检查汽车结构设计和评价其性能的分析方法。之后，这些分析方法就系统地应用于各种车辆的设计。这在整个汽车工业中获得了很大的成功。结果，许多汽车制造公司在几年内雇用了数百名结构工程师。今天，这些方法已成为车辆设计与研究过程的必不可少的部分。

本书的目的是介绍这些方法，阐述其结构力学基础，并列举它们在车辆结构设计中的应用实例。在第一章中，作者对汽车及其结构的演变过程做了历史的简要回顾，然后论述了对汽车结构分析需求的增长。第二章阐述了汽车结构的设计准则，没有这些准则，任何分析数据都将是毫无意义的。例如，车辆结构振动问题的动力解，如频率、振型和受迫振动振幅这些数据，只有当它们能和车辆乘坐舒适性和噪音这些准则相联系，才是有用的。第三至第八章论述建立车辆结构及其零部件的模型并进行分析以确定刚度性质和计算应力的方法。这些计算是为车辆运行的一系列条件而进行的。第九和第十章介绍车辆结构承受碰撞的冲击时的分析方法，这种冲击导致大变形和屈曲，而车辆的动能在塑性变形中被吸收。第十一和第十二章关于结构声学和结构优化的讨

论，阐述了在车辆结构分析中采用计算机的最新发展和应用。

除作者外，许多同仁在本书写作之前对汽车结构分析的发展作出了重大的贡献。他们包括 James A. Augustitus, Wilbur D. Birchler, John F. Harris, Robert K. Leverenz, Richard W. Marks, Peter P. Parsons, Dennis D. Schwerzler, Kurt S. Skattum 和 Curtis F. Vail。

作者感谢公爵大学土木工程系主任 Robert J. Melosh 教授对本书手稿的评阅。Melosh 教授早先与汽车工业有密切的联系，他对本书提出了许多有益的建议。最后，对为本书手稿打字的 Carrie M. McGee 和 Bonnie L. Stricklin 表示谢意，没有她们的帮助，这项工作是无法完成的。

Mounir M. Kamal 和 Joseph A. Wolf, Jr.

# 目 录

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 序 .....                                 | III |
| 前言 .....                                | V   |
| 第一章 汽车及其结构——历史的回顾.....                  | 1   |
| Mounir M. Kamal 和 Joseph A. Wolf, Jr.   |     |
| 第二章 建立汽车结构设计准则.....                     | 36  |
| Larry J. Howell 和 David C. Chang        |     |
| 第三章 矩阵结构分析导论.....                       | 90  |
| Joseph A. Wolf, Jr.                     |     |
| 第四章 汽车结构有限元模型的建立 .....                  | 111 |
| Martin R. Barone 和 David C. Chang       |     |
| 第五章 汽车结构系统的振动模型 .....                   | 150 |
| Joseph A. Wolf, Jr.                     |     |
| 第六章 汽车结构模型的求解方法 .....                   | 184 |
| Mark F. Nelson                          |     |
| 第七章 设计的刚度与变形分析 .....                    | 235 |
| Michael F. Kowalski                     |     |
| 第八章 设计的应力与疲劳分析 .....                    | 260 |
| Paul J. Tsai                            |     |
| 第九章 碰撞模拟 .....                          | 293 |
| Mounir M. Kamal 和 Kuang-Huei Lin        |     |
| 第十章 塑性变形分析 .....                        | 330 |
| David C. Chang 和 Chi-Mou Ni             |     |
| 第十一章 采用有限元法的结构—声学分析 .....               | 359 |
| Donald J. Nefske, Joseph A. Wolf, Jr. 和 |     |

Larry J. Howell

**第十二章** 结构设计的优化 .....392

James A. Bennett

译后记 .....418

## 第一章 汽车及其结构——历史的回顾

经过多年稳定的、预料之中的换型之后，美国汽车工业正处于其历史上最剧烈的产品更新之中。到1985年，制造厂家将要出产实际上不产生污染物而燃料消耗小得多的新型汽车。解决这个问题一个明显的步骤是改变汽车的大小，从而生产出一种更轻更小的汽车而不牺牲车内宽敞度和乘员的安全性。为完成这种汽车的设计，结构工程师将需要运用富于想象力的构思和各种新型材料。

过去，车辆结构设计是倚靠经验、大量的实验室试验和最后试车场评定与研究的。虽然存在一些分析方法，但却很难（如果不是不可能的话）应用到复杂的汽车结构中（图 1.1）。因此，重点是放在结构性状和性能的实验测定上。但是，对汽车设计师的要求迅速增加和变化。首先必须满足新的安全要求，然后要减轻重量以满足燃料经济性的需要。过去的经验不能推广至改变了大小的新车辆上，而且也没有关于新准则的现成的性能数据。因此，数学模拟是一种合乎逻辑的探索途径。首先，发展了特定结构性状的计算机模拟（尤其是在汽车的安全性方面）。然后，开发了计算机绘图程序包使能够以较少的建立模型的时间而得到汽车几何形状更精确的表示。最近，一种依赖于计算机的数值方法，有限元法已为车辆结构设计开拓了一条崭新的途径。

### 现代汽车结构

#### 车身—车架结构

今日的汽车结构是许多借适当地布置梁、柱和波形板使之刚硬的钣金冲压件的一个集合体。以美国制造的大多数大、中小型小

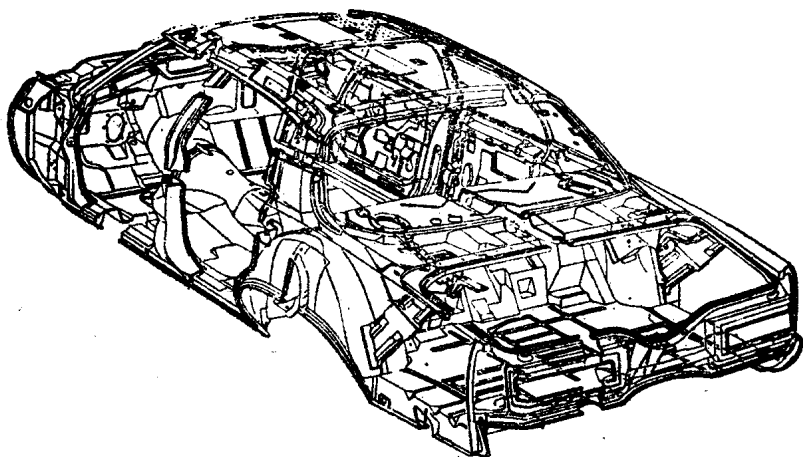


图1.1 典型的汽车车身结构(引自[1.33])

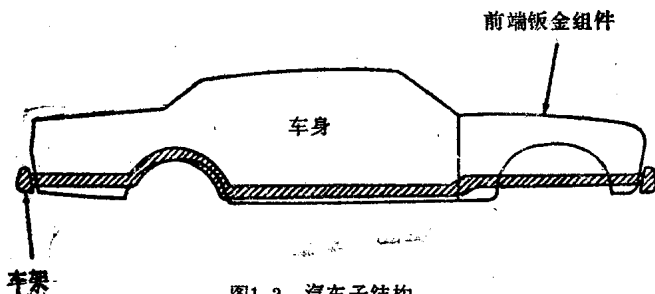


图1.2 汽车子结构

客车和轻型载货汽车来说，其结构由三个模块或子结构组成：车身、车架和前端钣金组件（图1.2）。

车身的明显功能是为乘员提供遮蔽、舒适和保护。结构上，它由典型的标准厚度为0.76至1.02的大而薄的壁板制成。这些车身壁板在零件制造厂用金属薄板压制而成并以按节省空间的零件套放而设计的专用集装箱或零件架运至装配厂。零件被装在夹具上进行装配，这些夹具沿装配线移动并在焊接时保持对准。当车

身主结构具有足够的刚度得以独立时，卸下夹具并装上其余结构零件。最后，安装门、窗、行李箱盖、装饰件等而完成装配。车身提供了车辆弯曲和扭转总刚度的四分之三。在撞车时，它用来抵抗向乘员空间的侵入。另外，它通过使用填衬的内饰、柔性的挡风玻璃和吸收能量的转向柱与仪表板而提供了缓冲作用。所有这些都有助于减轻一个未受约束的乘员对乘坐室内部的撞击。因此，车身是一个较为刚硬但却具有一个柔性内饰的结构。不过外部结构也希望具有有限的柔性，以减小车身所经受的减速度。

车架的功能是作为一个承载体，其上牢固地装有发动机、变速器、传动系、悬架和其他附件（图 1.3）。当这些部件安装在车架上之后，车架总成则在车身向下传送的工序中与车身配装。车架具有梁的功能，它增加了车身的弯曲与扭转的强度和刚度。在车辆碰撞的情况下，车架被迫产生撞击变形而吸收大部分的撞击能量。

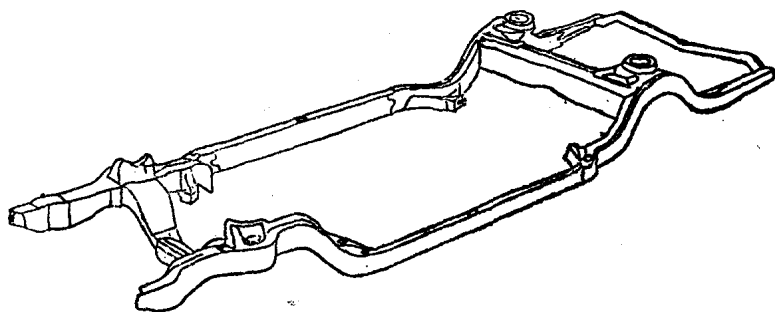


图1.3 车 架

前端钣金件主要是发动机及其附件的一个保护罩，在结构上有两个重要作用。首先，它将车架的前部与车身拉紧，从而增强整个车辆的刚性。其次，在正面碰撞时，它将吸收撞击总能量的三分之一。前端钣金件由与车身构造类似的金属冲压件装配而成，然后连接到车身和车架结构上。

这三个结构部件用螺栓连接在一起而形成整个车辆结构。车身和车架的连接是通过称为车身安装块的橡胶垫来完成。它们的

作用是隔离车身的高频振动，并提供整个车辆结构中的大部分阻尼。在汽车正常运行条件下，整个结构很少承受接近于设计极限的应力。相反，当按满足如变形和固有频率的设计极限等刚度准则的要求来确定结构尺寸时，则有充裕的材料来满足强度准则。

### 承载式车身结构

美国和西欧的大多数较小的汽车（称为小型汽车和超小型汽车）采用承载式车身结构（见图 1.4）。在这些汽车中，车身、车架和前端钣金件（除外前翼子板外）被焊在一起而构成一个单一的结构单元。在承载式车身结构中同样使用了车身—车架式结构中的梁、柱类构件以提供所要求的结构刚度。早在30年代末，这类结构的设计就在美国受到很大的注意。其较早的提出者〔1.1〕认为它减轻了重量并降低了成本。在美国，大型汽车的设计者继续采用车身—车架式结构主要是因为它能提供较好的隔振效果和行驶平顺性。但是，由于减轻重量和减少燃料消耗的需要已对它产生异议。

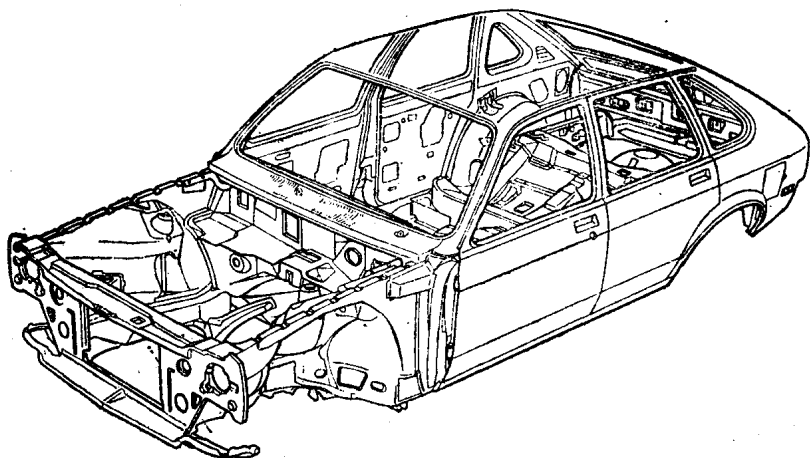


图1.4 典型的承载式车身结构

下面各章将详细介绍现代汽车结构分析方法。而在本章的其余部分，我们将简要地回顾一下汽车及其结构的历史，作为以下各章讨论的基础。汽油发动机的演变及其战胜蒸汽机和蓄电池而成为现代汽车原动机的过程在文献中已有详尽记载。马车则常被认为是可以安装发动机的现成的底盘。结果是汽车诞生所必需的两种基本技术的结合。但是，历史事实表明自行车是一个同等重要的伙伴[1.2]。它的发明、改革和生产制造对发展重量轻的底盘具有重大的贡献。事实上，许多早期的汽车设计就利用三轮车或四轮车来安装发动机。因此，我们将从自行车的发展来开始我们的回顾。

## 发明时期——1900年前

### 自行车——汽车的技术先驱

自行车是第一种大量生产的、用于人员运输的机器。因此，它在上一世纪中的技术进步和社会变迁两方面都扮演了重要的角色。在下面的年表中将会更详细地看到，在自行车技术发展中所出现的许多发明，后来都在汽车上采用。

1816至1818年间，一德国男爵 Karl Von Drais de Sauerbron 首次将两轮车(自行车)的基本思想变为实际的形式[1.3]。他的自行车是英国人称为“竹马”的一种改进型。它具有带一座位的木制框架、两个装在铁支座上的同样大小的木制车轮和一个使前轮转向的手把。骑者用双脚大踏步而推动自己前进。1839年，苏格兰人 Kirkpatrick Macmillan 添加了一套踏板和一个简单的刹车。1863年，法国人 Ernest Michaux 在前轮上采用了曲拐的踏板。随之而来的是自行车工业在法国的迅速成长。在其他国家也有许多革新和改进。自行车工业提供了发展一种重量轻、自己推动的车辆所必需的基础技术。下面所选的事件将有助于说明自行车工业的迅速演变：

• 1865年，Lallement 和 Carrol 获得了美国自行车第一个专

利权；

• 1869年，James Moore 在他的自行车上装了滚珠轴承，而在巴黎至鲁昂之间（135km）的国际竞赛中获胜；

• 1874年，一种可在轮毂与轮缘之间有效地传递扭矩的切线辐条车轮获得专利权；

• 1876年，采用了差动齿轮来驱动三轮车；

• 1877年，采用管式框架结构；

• 1879年，采用链条与棘轮驱动装置的第一辆后轮驱动的安全自行车获得专利权；

• 1885年，Rover 成为商业上成功的第一辆自行车。它具有现代自行车的所有基本机件。

自行车很适合于作重量轻的车辆。它可由骑者提起而跨过障碍。它能承载的重量为其自重的十倍。它既是一种有效的结构，又是一种能量效率高的机器。其关键在于有效地利用骑者强壮的腿部肌肉和使驱动轮转一圈时机器所走过的距离远远超过骑者跨一步的长度。自行车比其他任何一种已知的运输方式效率更高，而仅仅使用步行能量的五分之一。

自行车的流行导致对更好的道路的需求，而实际上为汽车铺平了道路。最后，自行车的成功导致其本身为汽车所取代。当人们变得习惯于由自行车所提供的自由以后，他们终于要求达到比原来用脚驱动车辆所提供的更为舒适的自由。

### 向自己驱动的车辆过渡

1882年，Ayrton 和 Perry 首次尝试使用电能来驱动一辆三轮车。但是，其结构不足以装载电池。1887年，Comte de Dion 建造了一辆三轮车，它有两个前轮和一个由蒸汽机驱动的后轮，这是所知的最早的一辆带充气胎的机动车辆。同年，Leon Serpollet 制造了一辆带两个后驱动轮的烧煤的蒸汽三轮车（图1.5）。这就是 Gardner-Serpollet 蒸汽汽车的前身。十年后的1897年，Stanley 兄弟制造了他们的第一辆蒸汽汽车。这是一辆坚固的重

量轻的车辆（图 1.6）。它有一个自行车式的管型车架、一个木制车身和通过链条和差动齿轮来驱动后轴的双缸发动机。底盘有弹簧、辐条车轮和充气轮胎。



图1.5 Serpollet的烧煤蒸汽三轮车(引自[1.3])

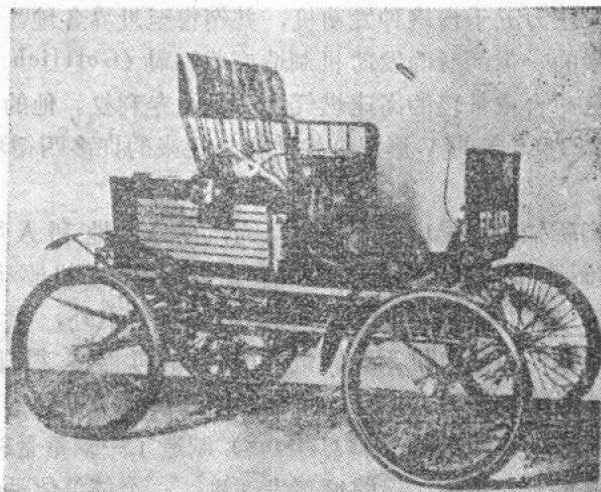


图1.6 Stanley蒸汽汽车