

汽车结构抗疲劳设计

● 邴 明 等著



● 中国科学技术大学出版社

汽车结构抗疲劳设计

酃 明

郭鲁比希奇 V.

费雪皚 G. 著

顾柏良

鲁三才

中国科学技术大学出版社

1995·合肥

汽车结构抗疲劳设计

酆 明 等著

*

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

全国新华书店经销

*

开本: 850×1168/32 印张: 7.375 字数: 183 千

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册

ISBN 7-312-00673-6/TH·4 定价: 9.00 元

606.22

序

陈清泰^①

汽车工业是我国经济发展的支柱产业之一。在我们几十年自行研究、开发的基础上,引进国外的先进技术和管理经验是加速发展我国汽车技术和汽车工业的一项重要措施。在国家科委和中国科学院的支持下,第二汽车制造厂和德国夫朗和费工作强度研究所合作,从1986年开始,用5年的时间,进行了“在中国运行条件下的卡车部件优化设计过程”的合作项目。这个项目得到国家科委和德国研究及技术部的拨款资助,中国科学技术大学担任了项目的技术顾问。

德国工作强度研究所在汽车抗疲劳设计方面拥有半个多世纪的丰富经验;二汽自70年代初自行开发产品,解决各类零件强度问题,也积累了一定经验。这个项目在两国专家和工程技术人员、工人的通力合作下,在汽车结构抗疲劳设计,特别是制订中国道路载荷谱和卡车车轮部件的轻量化方面取得了显著的成绩。为了推广这一项目的成果,中德双方的学者和工程师们编著了这本《汽车结构抗疲劳设计》,由中国科学技术大学出版社出版。这本书为研究在中国条件下的汽车结构件疲劳问题提出了有价值的理论分析、试验方法和参考数据。

^① 陈清泰先生于1982—1984年任第二汽车制造厂总工程师,1984—1992年任第二汽车制造厂总厂厂长,现为国家经济贸易委员会副主任。

这个项目的圆满完成和本书的编著出版充分体现了中德两国工厂、研究所、大学各方面人员的密切配合和团结友谊。希望这种“产、学、研”结合的形式进一步推广；希望这项应用型的研究成果能够为全国汽车行业所共享，并转化为现实生产力，从而为中国汽车技术的进步，为中国汽车工业更快发展作出贡献。

目 次

序	(I)
第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 载荷谱和累积频次分布	(3)
2.1 载荷谱的重要性及一般考虑	(3)
2.2 影响工作疲劳强度的主要因素	(6)
2.3 以累积频次分布表示的载荷谱	(10)
2.4 设计谱的主要参数	(21)
2.5 产品可靠性的考虑	(22)
第 3 章 载荷谱和功率谱	(26)
3.1 载荷谱的影响因素	(26)
3.2 应力时间历程的分离	(26)
3.3 应力时间历程的功率谱密度	(30)
第 4 章 设计载荷谱的制定过程	(33)
4.1 现场实地测试方法	(33)
4.2 现场实地测试程序	(34)
4.3 在中国进行的现场实地测试	(35)
4.4 现场测试数据分析和设计谱的推导方法	(39)
4.5 车轮和轮毂的设计谱的推导	(43)
4.6 设计谱推导实例	(52)
4.7 EQ140 汽车前轮和前轴的设计谱	(55)
第 5 章 材料的疲劳强度	(66)
5.1 金属疲劳现象	(66)

5.2	疲劳强度的分类	(67)
5.3	应力-循环曲线的参数	(70)
5.4	应力-应变曲线和应变-循环曲线	(77)
5.5	应力集中对疲劳强度的影响	(87)
5.6	加载形式对疲劳强度的影响	(88)
5.7	平均应力对疲劳强度的影响	(97)
5.8	表面条件及处理对疲劳强度的影响	(101)
5.9	焊接应力、腐蚀等对疲劳强度的影响	(111)
5.10	汽车安全零部件的断裂行为	(115)
第6章	疲劳寿命的估算	(134)
6.1	疲劳寿命预测的基本方法	(135)
6.2	疲劳寿命预测需要的数据	(138)
6.3	用局部应力法预测疲劳寿命	(139)
6.4	用局部应变法预测疲劳寿命	(149)
6.5	用相对 Miner 法则预测疲劳寿命	(155)
6.6	Palmgren-Miner 法则预测疲劳寿命的可靠性	(158)
第7章	疲劳寿命试验	(163)
7.1	疲劳寿命试验的分类	(163)
7.2	试验时间的缩短	(166)
7.3	试验的可靠性	(171)
7.4	疲劳模式	(175)
7.5	制定试验谱的原则和步骤	(175)
7.6	车轮部件的疲劳试验	(179)
7.7	LBF 双轴车轮/轮毂试验机 (卡车车轮及小客车车轮)	(202)
7.8	汽车车轴试验机	(219)
参考文献		(227)

第 1 章 绪 论

汽车和汽车工业在国民经济、现代社会及人民生活中具有十分重要的作用。在当前中国的经济建设事业中，汽车处于十分突出和优先的地位。近年来汽车工业在中国机械工业各行业中，其增长速度最高，比工程机械、机床工具、仪器仪表等行业都要高得多。但是中国汽车工业的发展仍然远远赶不上需要，每年都要进口大量的各种汽车。

由于种种原因，中国汽车工业距国际水平还有相当的差距，特别在产品设计和试验研究方面距离更大一些，这方面已经为中国的许多部门和企业所认识。

汽车是高速度运动并承载的机械，它的结构设计一定要考虑动态性能，不能按照静态设计的方法。在现代汽车结构设计中，要使结构做到尽可能的轻量化。因为结构重了，不但增加材料消耗和汽车成本，而且提高了汽车的油耗，例如中国目前批量生产的中型卡车的自重比世界先进的同档卡车要重 30% 以上，其油耗也要增加几乎同样的比例。

但是汽车作为一种交通工具，要求有高度的可靠性和安全性，这与结构轻量化常常是矛盾的，所以结构的轻量化设计要保证同时具有足够的可靠性和绝对的安全性，在这些方面，汽车设计和飞机设计有相似之处。

汽车所承受的外部载荷是随时间而变化的动态载荷，其中大部分是循环动态随机载荷。在这种载荷作用下，汽车的许多构件上都产生动态应力，引起疲劳损伤，其破坏形式是疲劳断裂。所以，汽车的结构轻量化设计实质上是一种结构抗疲劳设计。

结构的轻量化设计是从飞机结构的设计方面发展起来的。1938年由E. Gassner, O. Svenson等人建立的德国Darmstadt城工作强度实验室(LBF)在这方面有许多出色的贡献。这个实验室现名德国夫朗和费工作强度研究所,多年来培养了一大批专家学者,积累了大量的飞机和汽车等的结构抗疲劳设计和试验研究经验。在中国科学院和中国国家科委及德国联邦研究及技术部的支持下,中国第二汽车制造厂和该研究所合作,从1986年开始,用了五年的时间,进行了“中国运行条件下的卡车部件的优化设计过程”的合作项目。它以二汽批量生产的东风EQ140型卡车作为研究和试验的对象,选择了中国代表性的道路,测量和制定了动态载荷谱。在德国该研究所的自己开发的先进的疲劳加载模拟机上进行了中国卡车车轮部件和前轴、大梁框架等的实际寿命试验,对其中一些部件进行了改进设计。这次规模较大的合作研究是该研究所多年来在西欧和北美多年的道路测量和试验经验的基础上,首次系统地研究中国的汽车运行条件。我们发现中国的道路情况和驾驶习惯和西方有很大的不同,有中国的特色。因此中国的汽车设计一定要按照中国的道路载荷谱来进行。在项目进行中,中国和德国研究所的专家们多次到中国十堰、长春、合肥等地做报告和讲学。参加项目工作的工程技术人员也积累了许多经验。在中国科学技术大学还首次用英语开设了“结构抗疲劳设计”的研究生课程。本书是继“结构抗疲劳设计”^[1](1982年和1987年先后在德国和中国出版)之后,结合中德合作项目,进一步介绍汽车结构轻量化设计,包括载荷谱的制定,材料的选择,模拟试验及寿命计算等内容。

第 2 章 载荷谱和累积频次分布

2.1 载荷谱的重要性及一般考虑

在结构抗疲劳设计中，主要有两方面的问题，第一是用一定材料制成的构件的疲劳寿命曲线，一般用常幅加载疲劳试验来得到，试验结果有很大的离散性（疲劳试验的离散性比一般物理试验要大得多），通常在经过统计概率处理后表示为具有上下限（出现概率为 10% 至 90%）的曲线族，如图 2-1 所示。第二是该构件的工作应力谱，就是构件在外部载荷作用下产生的应力时间历程（动态应力响应）。一般意义下的载荷谱指的就是工作应力谱，因为后者可以实际测量出来（如通过电阻应变片）。但工作应力谱中包括了外部载荷及结构的动态特性的影响。工作应力谱一般也有很大的离散性，为了简明表达，在图 2-1 中没有画出它的离散性。工作应力谱也可叫做应力的累积频次分布，其最大应力在整个寿命（用循环次数表示）中只出现一次，愈小的应力出现的频次愈多。累积频次分布可以通过对工作应力的时间纪录进行统计处理来求得⁽¹⁾。

根据疲劳寿命曲线和工作应力谱的关系，有三种设计概念，第一种是静态设计，其根据是静强度，此时一般仅需考虑一个安全系数来选取许用的工作应力。第二种是工作应力须低于疲劳寿命曲线的疲劳耐久限（水平部分），这种设计概念只适用于汽车上很少的几种部件，如曲轴、气缸阀杆等。第三种是所谓考虑工作强度的设计，如图 2-1 中的情况 C，汽车的大部分构件都可运用这种

概念：即工作应力谱与疲劳寿命曲线不相交，最高工作应力可以大大高于疲劳耐久限，此时构件的寿命可以高于 2×10^6 ，寿命比 N_D 高得多，(N_D 是常幅加载的应力，相当于 C 谱最高应力时的寿命)。运用第三种设计概念，可以做到既轻量化（许用应力高），又安全可靠（寿命长，在使用寿命期间不出现疲劳破坏）。由此可见，除了疲劳寿命曲线（用常幅疲劳试验可求得）之外，工作应力谱的准确制定是抗疲劳设计的关键，也就是说载荷谱的制定是结构抗疲劳设计的基础工作。概括地说第三种设计概念可以叫做根据工作强度的设计，即运用实际使用条件下的载荷谱。

图 2-2 表示在根据工作强度设计的情况下的产品部件的开发步骤（包括设计阶段和生产阶段）。

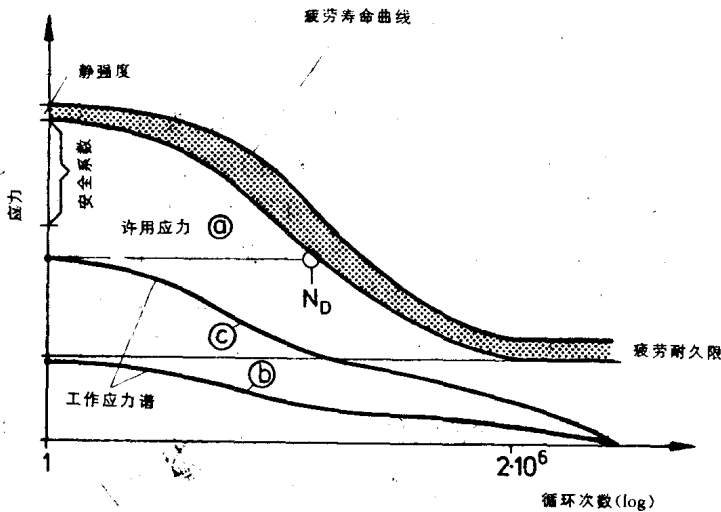


图 2-1 三种设计概念

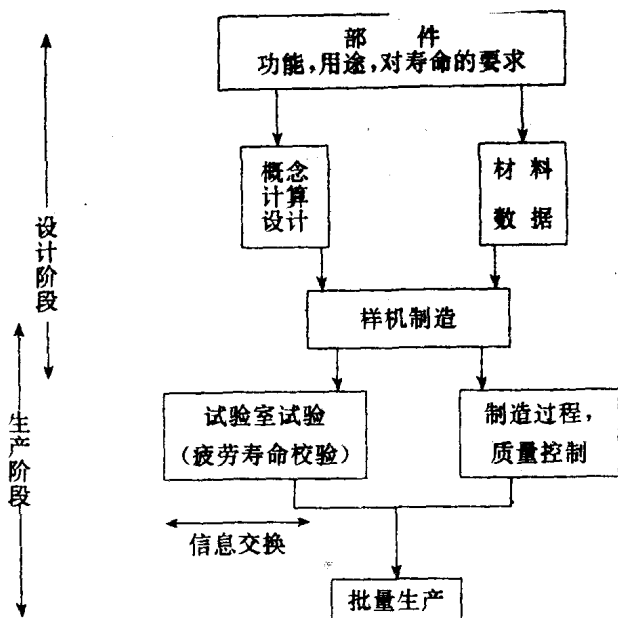


图 2-2 根据工作强度设计的情况下的产品开发步骤

在工作应力谱的制定中，首先要弄清楚该部件对于汽车性能的重要性。根据重要性不同，可以将汽车的各部件划分为 A、B、C 三种，如图 2-3 所示。

第一类部件中的第一种 A，如车轮、轮毂、轴承、转向节等称为安全部件，它们的断裂对用户或环境都将是十分危险的，因此在这些部件的整个使用寿命期间不允许发生断裂。

第一类部件中的第二种 B，如连杆、曲轴、起动杆等称为功能部件，它们的断裂将破坏汽车的功能，因此要避免发生断裂。

汽车的第二类部件，如车身的局部位置、汽车的一些内部附件，它们的断裂不会影响安全及功能，其设计主要考虑其他因素，例如美观、成本等等。

对于 A 种部件、制定其工作应力谱时，必须要包括汽车用户

的所有使用情况，在正常的汽车使用期间，要求不会发生整个部件的断裂。特别是供部件设计根据用的设计载荷谱，必须考虑各种最严重的使用情况，而对于B种，尤其是C种部件，其设计载荷谱一般可以只考虑平均的使用情况。

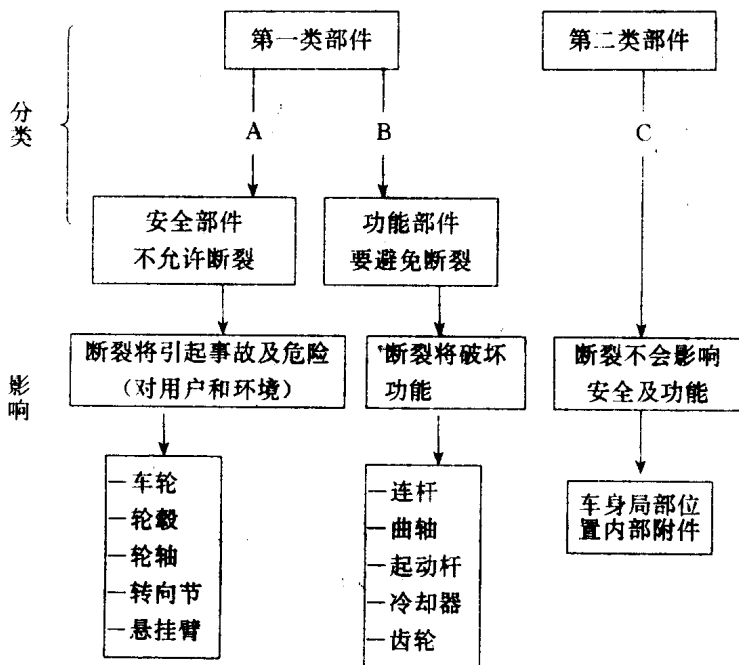


图 2-3 两类三种汽车部件

2.2 影响工作疲劳强度的主要因素

结构的工作疲劳强度就是该结构在实际工作载荷作用下所具有的疲劳强度。实际工作载荷在大部分情况下都属于随机性质，所以工作载荷谱一般都是随机载荷时间历程。

工作疲劳强度用应力-循环次数 σ -N 或叫 S-N 曲线来表示。

影响结构的工作疲劳强度的因素很多,归纳起来有四个主要方面: 载荷(包括环境的因素); 材料; 设计; 制造工艺。这四个方面又是互相联系的, 如图 2-4 所表示。

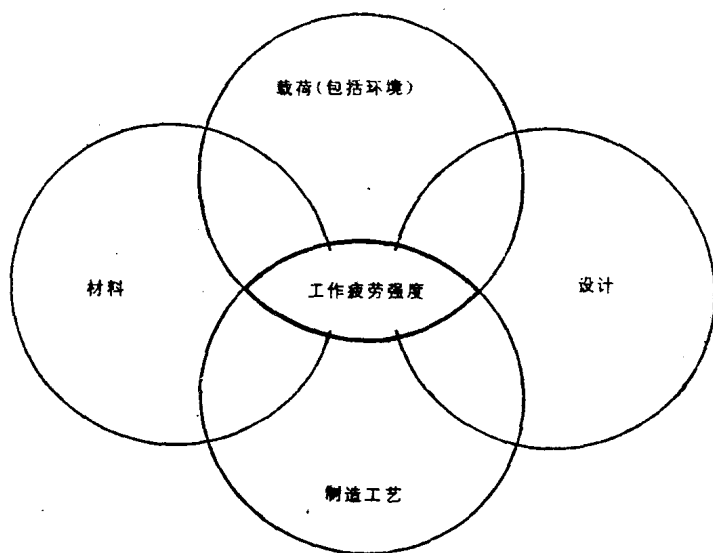


图 2-4 影响结构工作疲劳强度的主要因素

图 2-5 是一张表示疲劳强度的 S-N 曲线, 所施加的载荷谱(应力时间历程)有常幅及变幅两种。纵横坐标值都用对数表示。常幅应力时间历程的幅值的累积频次分布(CFD)是一个矩形。变幅应力时间历程的幅值的累积频次分布可以是正态、准正态、直线、对数正态等形式, 一般的情况是高应力出现的频次少, 低应力出现的频次多, 最高应力在全部循环次数中只出现一次。S-N 曲线是常幅加载的情况, 为一族曲线, 存活概率 $P_s=90\%$ 的下限曲线连结了各应力水平下, 有 90% 的构件的疲劳寿命大于或等于某循环次数 N 的点, 而 $P_s=10\%$ 连结了有 10% 的构件的疲劳寿命

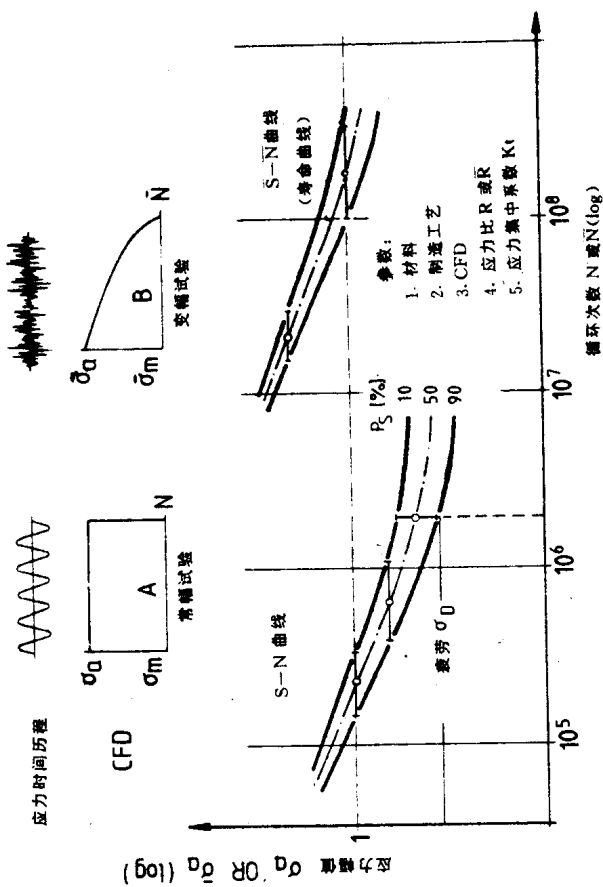


图 2-5 应力时间历程及疲劳寿命

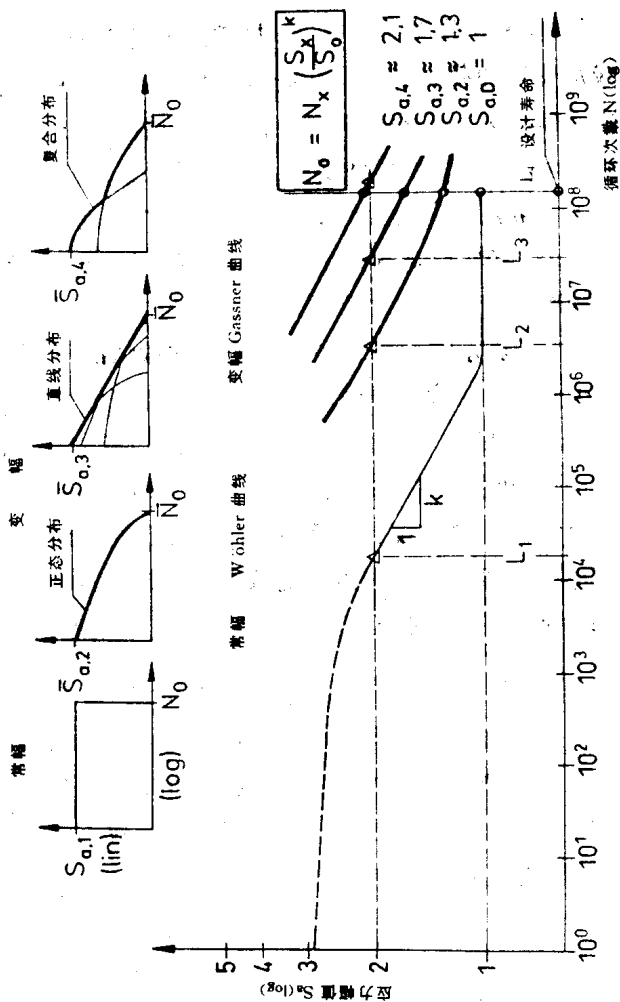


图 2-6 载荷谱 (累积频次分布) 对疲劳寿命的影响

大于或等于另一循环次数 N' (位于上限曲线上) 的点。图中的应力幅值 σ_0 为在此应力水平下, 构件的疲劳寿命为 2×10^6 次。 $\bar{S}-\bar{N}$ 曲线是变幅加载的情况, 也是 $P_s=10 \sim 90\%$ 的曲线族。由于变幅加载, 高应力出现的频次少, 在同样的最高工作应力下, 疲劳寿命要大得多。如图中虚线所表示的幅值 σ 或最高应力幅值 $\bar{\sigma}=1$ 的作用下, 常幅加载的疲劳寿命约为 3×10^5 , 而变幅加载的疲劳寿命可达 2×10^6 。影响 $S-N$ 和 $\bar{S}-\bar{N}$ 曲线的因素有: 材料, 制造工艺, 累积频次分布, 应力比 R 或 $\bar{R}$, 应力集中系数 K_t 等。

图 2-6 表示常幅加载和各种变幅加载情况下, 载荷 (表示为累积频次分布) 对疲劳寿命的影响。常幅加载的 $S-N$ 曲线, 又被称为 Wöhler 曲线, 以纪念疲劳试验的创始者——德国工程师 A. Wöhler; 变幅加载的 $\bar{S}-\bar{N}$ 曲线又被称为 Gassner 曲线, 以纪念工作疲劳强度概念的提出者和著名的八级程序加载的创始者——E. Gassner 教授。图中加载的载荷有矩形 (常幅)、正态、直线、复合四种分布, 在同一应力水平 2 之下, 其相应的疲劳寿命为 L_1 、 L_2 、 L_3 及 L_4 , 其中 L_4 要比 L_1 约高 $\frac{10^8}{2 \times 10^4} = 5000$ 倍之多。如以 10^8 为设计要求的疲劳寿命, 且以常幅加载的许用疲劳应力 $S_{a,d}$ 值为 1 (即所谓的疲劳耐久限), 则各种变幅加载情况下的疲劳应力可以提高到 1.3 、 1.7 和 2.1 倍。累积频次分布愈不饱满的, 疲劳寿命愈大, 许用疲劳应力愈高。

2.3 以累积频次分布表示的载荷谱

在大多数情况下, 车辆在运行中承受的都是变幅载荷, 作用在车辆构件的载荷来自道路的不平度、制动、加速、转弯、发动机及传动等。在分析载荷对疲劳寿命的影响时, 必须对载荷来源区别清楚。