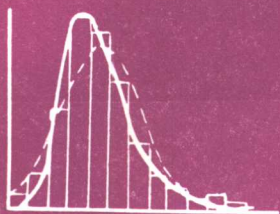


汽车可靠性理论

杨万凯 刘承胤 编著

张 烨 主审



QICHE KEKAO
XING LILUN



人 民 交 通 出 版 社

Qiche Kekaoxing Lilun

汽车可靠性理论

杨万凯 刘承胤 编著
张 烨 主审

人 民 交 通 出 版 社

内 容 简 介

本书较全面地阐述了汽车可靠性理论的重要性、基本概念及研究内容和方法。

本书主要包括：汽车可靠性概念及数学表示；汽车可靠性基础知识及常用的几种理论分布的应用；可靠性数据的统计推断；统计控制与质量管理；汽车整车、磨损零件和疲劳零件的寿命及其可靠性评价；不完全样本及少数样本的可靠性评价与数据整理，以及使用调查数据与试验数据的对应分析；汽车可靠性预测；汽车系统可靠性分析；汽车可靠性设计与最优化；汽车可靠性试验；汽车可维修性与更新理论；可靠性物理。

本书可供从事汽车、拖拉机、工程机械和汽车维修管理的工程技术人员使用，亦可供高等院校有关专业师生及研究生阅读参考。

汽车可靠性理论

杨万凯 刘承胤 编著

张烨 主审

责任编辑：梁恩忠

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：850×1168 1/32 印张：18.75 插页：3 字数：492千

1986年12月 第1版

1986年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,750册 定价：5.50元

序 言

可靠性理论是近二三十年来发展起来的一门新兴学科。在第二次世界大战期间，它为保证军用产品的高度可靠而受到重视。从五十年代起，一些工程技术人员和数学家们又运用概率论和数理统计学对产品的可靠性问题进行了定量研究，于是可靠性理论逐渐发展成为技术科学中一个新的分支。

最初，可靠性理论研究主要着重电子系统和产品的可靠性分析与设计。后来，逐渐发展到研究结构、机械、机电等机器设备，以及由该机器所组成的系统可靠性问题，其应用范围也从比较尖端的工业部门扩展到一般工业部门。目前，可靠性设计和分析已成为许多工业部门中产品发展工作中不可缺少的重要一环。

1969年人类首次飞离地球到达月球，这无疑地将作为具有划时代意义的事件载入人类史册，同时也显示出可靠性理论的卓越成就。但当今世界，特别在汽车工程中尚存在许多不可靠及不安全因素。随着汽车结构日趋复杂和性能不断提高，使用部门对汽车产品要求完好可靠，索赔、退货制度的出现，给汽车工业提出许多急需研究和解决的课题，即汽车可靠性理论越来越被人们所重视。

由于汽车的载荷、强度等受许多因素影响，而这些因素的变化以及由此而造成的故障（或失效）现象都具有随机变化的特征，即呈概率分布现象。因而，汽车可靠性问题长期以来得不到满意的解决。为了保证汽车的可靠性，一般在设计计算中对计算的载荷等分别乘上各种安全系数。它是我们对这些因素的随机变化所作的经验估计。这表明我们对这些随机变化情况无法进行精确的估计，只好对汽车各参数作出不精确的放大，即用安全系数来防止故障发生的可能性。然而，用概率论和数理统计方法来分析汽车零件、总成和系统的可靠性，则使问题的解决建立在一定的科学理论基础之上，可以获得比较精确的，更符合实际的结果。

汽车可靠性理论就是以概率论和数理统计等数学为理论基础，以信息和试验数据为研究资料，以电子计算机为辅助手段，并立足于系统工程方法，权衡经济得失，将汽车的不可靠性减少到令人满意的程度，从而进行精确设计、合理维修、科学管理的一门边缘学科。汽车的可靠性比其他任何汽车性能更重要，它必将成为二十世纪我国汽车设计、制造、试验、使用维修、质量管理的主要课题。

汽车可靠性理论中许多问题的处理尚未臻于完善，我国在研究汽车可靠性理论方面仅刚刚开始，笔者在编写此书的过程中更感到力不从心。由于1980年底我们受中国汽车工业公司质量管理部的委托，在整理海南试验站五次全国汽车质量考核试验的基础上，编写出《汽车耐久性与寿命》一书。1983年6月4日笔者被邀为第一汽车制造厂教育处和质量管理处首次讲述了“汽车可靠性理论”课程。根据学员们的要求，并为了引起汽车行业广大科技人员和学者的关注，在教育“面向现代化，面向世界，面向未来”的思想指导下，为了推动教学内容的改革，推动汽车可靠性理论研究工作的迅猛发展，便把手头上的资料加以整理，编成此书，供从事汽车研究、设计、制造、使用维修和教学单位的同志们参考，希望它能起到抛砖引玉的作用。

鉴于汽车可靠性理论一些概念及所用到的数学分析方法比较新颖。所以，我们力求由浅入深，采用从分析具体实例着手，逐渐把问题扩展到全面的方法进行论述，并且对汽车可靠性理论中涉及到的数学知识做了简要介绍，以便更容易理解本书内容和应用各种结论及方法。

本书第四章、第十五章的第一节、第二节由刘承胤编写，其余均由杨万凯编写。全书由刘承胤审阅，张烨教授主审。

由于我们水平有限，研究肤浅，不妥之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 汽车可靠性理论概述	1
第一节 汽车可靠性的重要性.....	1
第二节 可靠性理论发展历史.....	4
第三节 国外汽车工业的可靠性研究情况.....	5
第四节 汽车可靠性理论主要研究内容.....	9
第五节 汽车产品可靠性特点及提高可靠性的途径.....	10
第六节 汽车可靠性理论与数学方法.....	15
第二章 汽车可靠性基础知识	17
第一节 随机事件及其概率.....	17
第二节 随机变量及其分布.....	26
第三节 随机变量分布的数字特征.....	28
第四节 汽车可靠性理论中常用的几种理论分布的应 用.....	35
第五节 汽车可靠性理论中常用的几种理论分布的应 用表.....	53
第三章 汽车可靠性概念及数学表示	56
第一节 汽车可靠性概念.....	56
第二节 汽车及零件的寿命指标.....	73
第三节 汽车故障特征及其分布规律.....	82
第四章 可靠性数据的统计推断	88
第一节 基本概念.....	88
第二节 参数估计.....	91
第三节 假设检验.....	101
第四节 总体的分布函数的假设检验.....	109
第五章 统计控制法	114

第一节	质量控制与抽样检验概述	114
第二节	过程控制	116
第三节	抽样检验	134
第六章	汽车整车寿命及其可靠性评价	155
第一节	指数分布的参数估计	156
第二节	定数截尾试验和定时截尾试验的参数估计	162
第三节	置信区间的估计	164
第四节	非零最小寿命的估计	170
第五节	假设检验	173
第六节	完成试验的期望时间	177
第七节	不知分布形式的非参数法	179
第七章	汽车零件的耐磨寿命及其可靠性评价	181
第一节	发动机气缸壁磨损与耐磨寿命的研究	181
第二节	汽车零件磨损量数据的统计分析	189
第三节	汽车零件耐磨寿命与可靠性评价	196
第八章	汽车零件的疲劳寿命及其可靠性评价	204
第一节	威布尔分布及其概率纸原理	205
第二节	用威布尔概率纸估计参数及评价可靠性	213
第三节	用变差系数法估计参数及评价可靠性	233
第四节	截止试验节省的时间	237
第九章	汽车可靠性少量数据的分析	238
第一节	可靠性数据收集与分析的重要性	238
第二节	不完全样本的数据分析	239
第三节	节省试验时间法	243
第四节	用少数样本进行可靠性评价	247
第五节	通过零件估计总成可靠度	251
第十章	汽车可靠性预测	255
第一节	汽车可靠性预测的必要性和目的	255
第二节	零件强度与应力间干涉的预测	257
第三节	汽车零件疲劳的基础知识	259

第四节	$s-N$ 及 $P-s-N$ 疲劳曲线	261
第五节	零件疲劳寿命的可靠性预测	275
第六节	汽车系统的可靠度预测	298
第十一章	汽车系统可靠性分析	300
第一节	系统可靠性分析方法	300
第二节	简单系统的可靠度	301
第三节	指数分布时的系统可靠度及其平均寿命	307
第四节	威布尔分布时的系统可靠度及其平均寿命	311
第十二章	汽车可靠性设计	321
第一节	可靠性设计概述	321
第二节	汽车可靠性设计原理	328
第三节	汽车零件可靠性设计方法	375
第十三章	汽车可靠性的最优化	408
第一节	可靠度分配	408
第二节	可靠度提高	416
第三节	有效度的调整	423
第四节	可靠性最优化的动态规划方法	430
第五节	应力-强度计算的最优化	437
第六节	可靠性设计在降低费用和优化设计中论证	445
第十四章	汽车可靠性试验	457
第一节	可靠性试验的目的和种类	457
第二节	寿命试验	463
第三节	试验条件与规范	466
第四节	汽车零件的磨损试验	469
第五节	汽车零件的疲劳试验	476
第十五章	汽车可维修性与更新理论	493
第一节	可维修系统的有效度与可靠度	494
第二节	更新理论	514
第三节	汽车的预防维修与最佳周期的确定	534
第十六章	可靠性物理概论	557

第一节	可靠性物理概述.....	557
第二节	失效模式后果分析.....	558
第三节	可靠性物理模型.....	568
参考文献.....		580
附录一	正态分布表.....	584
附录二	t 分布表.....	586
附录三	χ^2 分布表.....	588
附录四	F 分布表.....	590

第一章 汽车可靠性理论概述

第一节 汽车可靠性的重要性

一、无故障是最重要性能指标

用户对汽车性能的要求，对产品是否先进、好坏，有许多评价指标：汽车的可靠性；燃料经济性；动力性；可维修性；通过性；平顺性；售价等。汽车可靠性是最基本，最重要的指标之一。

汽车可靠性差，将失去信誉，失去市场，失去使用价值。汽车经常调修，小故障不断，常换件，耐久性差，都是可靠性差的表现。

国外近十年来，发动机第一次大修里程增加很多，苏联吉尔130发动机，已从1964年的12万 km 提到目前25万 km 左右。欧、美、日等国的柴油机都在30~40万 km。而国产汽油发动机第一次大修里程一般在10万 km 左右，发动机缸壁磨损率一般为 $3.5\mu\text{m}/10^3\text{km}$ 。苏联3.48L的发动机，1951年其磨损率为 $5.1\mu\text{m}/10^3\text{km}$ ，1960年为 $2.5\mu\text{m}/10^3\text{km}$ ，1967年降为 $1.85\mu\text{m}/10^3\text{km}$ ，即17年间发动机磨损率下降3倍，大大地提高了汽车的可靠性与耐久性。

二、不正常停修是最大的经济损失

汽车不正常停修对运输企业损失很大，国外有的国家对计划外的停修费用规定为8.1%，尚要求压缩。

例如，美国圣路易斯市一车队，每天每车（一年平均365天计）要完成14459t·km，运距为826km，运价为0.04美元/t·km，

如每天少出一辆汽车，则减少收入 463 美元。该车队共有 322 辆汽车，670 辆半挂车，如果平均停 1h，其经济损失就很大。因此，美国对汽车可靠性特别重视。相比之下，我国某大城市一车队每天每辆汽车只完成 506t·km，运距为 78km，空闲时间多，对计划外的停修又很少统计，还体会不到可靠性的重要意义。

三、退货事件的影响

国外一般都实行了索赔制度，这是提高汽车可靠性的重要法律保证。

1969 年 6 月日本出口到美国的汽车遭到退货的危机，其结果影响很坏。这不是说日本的汽车故障增加了，而是说明美国的用户对汽车可靠性要求提高了。

现代汽车作为交通工具在社会上已经普及，因此要求它在任何条件下都能可靠使用，这对汽车产品的声誉影响很大。虽然已经退回汽车的实际故障率并不太多，且日本退货情况在世界上也是比较低的国家，但对汽车出故障的用户来说，却处于 100% 的困境中。为使用户信得过，就必须向社会提供能够满足用户要求的可靠性高的汽车。

图 1-1 是 1966 年到 1970 年间的美国和日本国内公布的退货件数统计表。

由图可知，除没有进行换型的伏克斯瓦根公司外，即使有悠久历史的美国三大汽车公司，其退货事件都未呈现明显减少倾向。这说明，为创造无退货汽车是需经长期持之以恒的努力。

美国和日本各汽车公司对汽车产品都实行了三保，即退、赔、换，国外叫索赔制。国内有

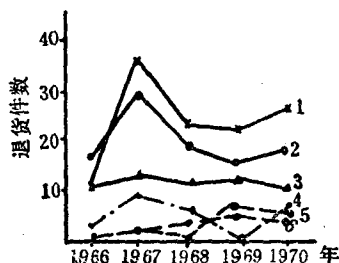


图 1-1 美国和日本国内各年汽车退货情况

1-克莱斯勒公司；2-通用汽车公司；3-福特汽车公司；4-伏克斯瓦根公司；5-丰田汽车公司；6-日产汽车公司

的汽车制造厂也在试行。

发生索赔的汽车中，要注意关键零件，重要零件，一般零件的可靠性，对此零件还应当预测。

四、零件数增加要求提高可靠性

汽车本身技术的提高和日趋复杂化是影响汽车可靠性的主要因素之一，这一点是不能忽视的。尤其是最近装有电子燃料喷射装置、电子防抱装置及其他电子自控装置的汽车日益增多，预计近来汽车零件数目将从1万很快增至10万个。零件数目的增加，装置的复杂化，不仅要求长期正常地发挥其功能，而且在任何情况下都能可靠地工作。这样，可靠性就变得更加重要。

假设某汽车总成约有5000个零件，每件可靠度为0.99，那么汽车总成的可靠度就很小了。所以，随着汽车产品的技术日趋先进、复杂，随着交通流密度不断增大，用户对汽车可靠性的要求也越来越高。为使汽车工业迅速健康地发展，必须竭尽全力，研究制造可靠性高的汽车。

五、战备的需要

我国土地辽阔，边防线长，地形复杂，气候变化多端，汽车可行驶在高原山区，沼泽地带，甚至荒漠秃岭之中。所以，汽车可靠性和可维修性对军用越野汽车和战备使用的汽车特别重要，因为，它也是决定战争胜败的一个重要因素。

六、提高可靠性经济效益显著

有人认为研究可靠性工作在经济上是不合算的，为了提高可靠性就必须采取各种措施，这将会提高产品成本，这种看法是不正确的。实际上，对生产单位来说，可靠性不仅能提高产品信誉，减少废品、减少退赔、节省时间，而且还有现实的经济利益。例如西屋公司为提高产品的可靠性作了一次彻底的设计审查，所得收益（成本下降）是为提高可靠性所化费用的100倍之

多。表1-1为设计审查对提高可靠性所获效益。

设计审查对提高可靠性所获效益 (单位: 美元)

表1-1

设计审查所需费用	44350
生产费用的增加	10000/年
经18次设计审查所节约的款项	1205410/年
设计审查化费每一美元所得利润	23

这种经济效益的获得是从提高可靠性的愿望出发, 从设计到制造的各工序进行彻底的重新审议的结果。从这里可产生一种新概念, 即可靠性技术是各种技术中最基本的技术, 也是最重要的技术。

第二节 可靠性理论发展历史

可靠性这一名词是在第二次世界大战期间提出来的。当时, 雷达系统屡出故障。在太平洋战争期间, 美国向远东运送的装置中, 有70%的航空用电子装置, 60%的海军用电子装置发生了故障。

美国从1943年开始正式投入可靠性研究工作, 当初把主要精力用于解决真空管的质量问题, 因为真空管是发生故障的关键, 最后终于生产出可靠性高的真空管。尽管零件质量提高了, 但装置的故障并没有消除。因此, 随着装置的复杂化, 仅零件无故障还不够, 必须考虑整个系统的可靠性。

可靠性系统研究工作是从1950年开始的。1957年发表研究报告, 包括生产、试制时的可靠性测定法、标准规范的编制, 研究范围极广, 其基本设想今天仍在使用。1959年美国国防部设立电子装置可靠性咨询组 (AGREE), 其研究结果为美国可靠性工程奠定了基础。这十年间, 完成对可靠性的基本研究后, 又遵循着两条不同的道路继续研究, 并取得了进展。其一是从使用角度

考虑的可靠性以及从经济上考虑的维修性和成本效果等的研究。其二是对零件的故障进行物理性能的研究，并形成了一门新的学科——可靠性物理（或称失效物理）。过去对故障发生的原因总是靠经验和宏观的观察来推测，可靠性物理的出现，令人放弃了那种认为故障是不可避免的想法，而是采取了科学的态度，认真研究发生故障的原因，设法从根本上预防故障。

1969年7月阿波罗11号登月成功，更显示出可靠性工程的卓越成就。

日本从1951年接受可靠性思想，1956年引进可靠性技术。1958年日本科学技术协会设立了可靠性研究委员会，并开始普及有关可靠性方面的工作。1960年成立可靠性及质量控制专门小组，1970年在日本国家标准中规定了可靠性术语。在国铁新干线，电报电话会的电话网、日本航空公司的运行、安全管理、以及在飞机、电子仪器、推土机等公司的各领域内大力开展了可靠性研究。

1969年日本汽车行业以退货问题为转机，对可靠性更加关注，并时时注视着汽车可靠性理论的发展趋势。

我国关于可靠性理论的研究是从六十年代末七十年代初开始的。像航天工业部708所，电子工业部四所、五所等单位是开展可靠性研究比较早的部门。近几年来，在汽车行业也开始了可靠性研究工作。1983年6月4日第一汽车制造厂首次举办了“汽车可靠性理论”学习班，接着1983年11月7日中国汽车工业公司又举办了“汽车可靠性基础知识”学习班。1983年8月在天津召开了汽车可靠性工作会议，会上决定了开展汽车可靠性理论的研究课题。

第三节 国外汽车工业的可靠性研究情况

一、日本的汽车可靠性研究

1969年6月发生退货事件之前，日本的汽车可靠性重点研究

有:

1. 确保强度方面的安全性;
2. 延长汽车保用期限;
3. 延长维修期。

(一) 强度方面

对强度的研究工作是在第二次世界大战结束后不久,即从1947、1948年开始的。1949年制定了汽车强度标准。正式的强度计算是以此为基准的。到1955年进行这些研究的汽车技术会设立了汽车强度委员会,继续进行这方面的研究。但正式从可靠性角度来研究强度问题,还是近些年的事。

(二) 延长保用期

延长保用期是各公司为努力满足用户的呼吁而采取的措施。图1-2示出过去十年中,在美国市场上的通用、克莱斯勒、伏克斯瓦根及日本丰田汽车的保用期变化情况。

由图可见,为逐年延长保用期,各汽车厂家进行了很大努力。但以1968年为界便止步不前,这表明不断延长保用期有一定困难。

(三) 延长维修期

国外研究延长维修调整检查期,延长换润滑油间隔时间以及采用不加润滑油的结构等,称为“无维修保养”,从减轻用户使用消费的意义上讲是非常重要的,也是今后的努力方向。

1969年6月所谓退货问题已成了日本的社会问题。以汽车工业会为主,联合零件、车身、销售、维修等所有有关行业设立了“汽车安全对策协议会,以退货问题为转机,从确保汽车安全性出发,汽车工业的可靠性研究便逐渐地开展起来了。

在丰田系统的各公司内也以可靠性委员会等组织为中心,除继续采取很早就开展起来的质量管理措施外,还进一步以对产品的认识新的方法为基础,开展可靠性研究。

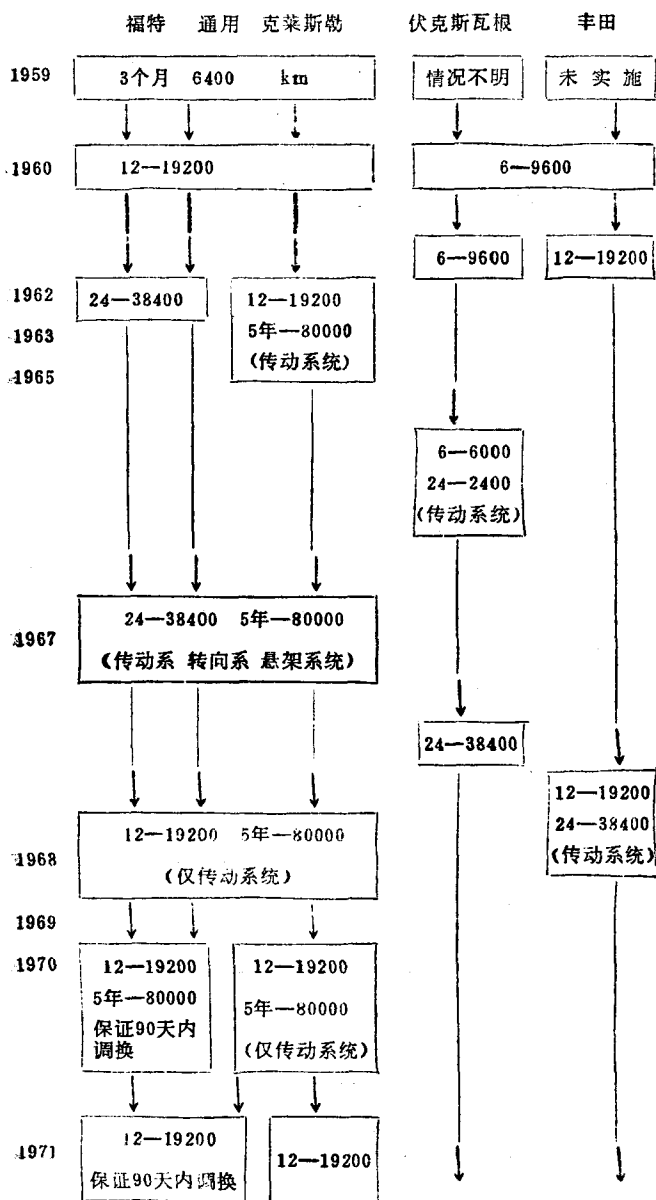


图1-2 美国市场汽车保用期变化情况

二、美国三大汽车公司的可靠性研究

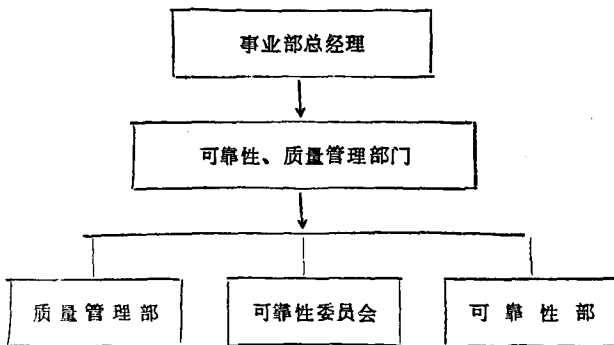
美国的国内市场环境条件和使用条件因地方不同其差别是非常大的，并由于美国各汽车公司的国外分公司遍布世界各地，所以他们经常进行汽车在各种使用环境下的试验工作。他们把试验场也设置在底特律和亚利桑那州的接近沙漠的荒原上和洛基山脉中。

但是，以明确的观点进行可靠性研究是在六十年代中期才大力开展起来的。美国三大汽车公司可靠性研究方式的特点是有组织，规模大，而且工作扎实。

美国通用汽车公司的别克公司在设计、试验、生产、服务几个步骤都安排了如下的工作程序：

1. 制定可靠性目标；
2. 研究设计、工艺、质量管理方法，防测汽车产品可靠性。

采取为达到可靠性目标的实施方法，按图1-3所示的组织机构加以实施，协作企业也参加到各组中来，并由可靠性委员会负责全面指导、处理问题。



可靠性委员会由下列人员组成：可靠性质量管理委员会负责人，技术部长，可靠性部长，质量管理部长，制造部长，采购部长，服务部长。

图1-3 别克分公司可靠性组织机构

1966年，福特汽车公司把投资几百万美元建成的可靠性研究