

# 发动机质量分析与工作性能优化

梁金广 著



北京理工大学出版社

# 发动机质量分析与工作 性能优化

梁金广 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书以工程实际案例为切入点,介绍了发动机产品质量分析的经验分析法和系统理论分析法在发动机两大机构、五大系统失效案例分析中的应用,对相关专业学生及技术人员进行发动机产品质量分析具有一定的指导意义。针对混合动力电动汽车发动机油耗特性的不确定性问题,本书通过建模、理论推导得出此类发动机的效率模型,使相关人员可以通过该模型计算出发动机的换气损失和排气能量,确定“动态”变化的高效工作区。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

发动机质量分析与工作性能优化 / 梁金广著. -北京:北京理工大学出版社, 2019. 9  
ISBN 978-7-5682-7125-7

I. ①发… II. ①梁… III. ①汽车-发动机-质量分析 ②汽车-发动机-性能分析  
IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 106396 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京金品印艺图文设计有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 8

字 数 / 210 千字

版 次 / 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 江 立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

莱诺依尔 (J. J. E. Lenoir) 于 1860 年发明第一台商业化煤气内燃机, 至今已逾一个半世纪。科学工作者们不断采用新技术、新材料、新工艺, 努力提高发动机的经济性、可靠性, 以及减少污染物的排放。发动机是汽车的动力源, 也是汽车各组成系统中最为重要的总成部件, 它的技术水平是评价整车技术水平最为重要的指标。提高发动机的工作效率是实现节能减排最为直接的手段; 而发动机可靠性的提高有利于延长其使用周期, 从而提高其经济性, 也有利于减少发动机生产过程中的污染物排放。

本书第一篇“发动机质量分析”主要论述汽车发动机产品质量分析的经验分析法和系统理论分析法, 以及如何通过以上两个分析方法在曲柄连杆机构、配气机构、供给系统、点火系统、冷却系统、润滑系统和有害物排放控制系统常见失效案例中的应用来制订汽车发动机失效分析策略。同时, 此篇详细论述了 2 个汽车售后市场公认的典型发动机疑难失效案例的成功分析过程, 以及应用系统理论分析法完成某发动机异响失效案例分析的实例。其中, 正时链条张紧器失效案例的分析采用了系统理论分析法的分支, 即售后市场调研结合售后市场验证的发动机失效分析方法; 机油消耗过高失效案例的整个分析过程思路清晰、逻辑性强, 经验分析法应用合理。

本书第二篇“发动机工作性能优化”主要针对混合动力汽车发动机因油耗特性的不确定性, 而使其难以被准确控制在高效工作区的问题, 通过建模、理论推导得出用于定量计算低速、稳定、层流流动的实际气体流能量的牛顿理想气流能量方程, 从而定量计算出发动机的换气损失和排气能量。此篇提出了采用换气当量损失和换气经验当量损失建立混合动力车用汽油机效率模型, 用于确定发动机“动态”变化高效工作区的理论。其中, 换气经验当量损失仅利用汽油机进、排气压力两个参数, 就可以准确地确定发动机“动态”变化的高效工作区, 且较换气当量损失具有更好的瞬态响应性。同时, 此篇还理论推导出了汽油机的燃烧效率, 排气的气体常数、定容比热容、定压比热容比热比, 以及进气的气体常数等计算公式。

本书便于相关科技人员深入理解发动机质量分析和工作过程优化工作, 灵活应用发动机理论知识分析、高效积累工作经验。特别是提出的用于指导汽车发动机失效分析工作的

策略和混合动力车用汽油机效率模型，不但有利于提高发动机失效分析工作的效率、降低企业和用户的损失，还有利于优化发动机零部件的设计和生产工艺，促进对引进的新技术、新设备的消化吸收；并能为车企售后服务部门正确、高效处理现场问题提供理论依据，也为国家制订科技发展规划、制订或修订相关标准（规范）提供理论依据等。

第 1 章 汽车发动机质量	(3)
1.1 汽车质量现状	(3)
1.2 汽车质量问题的危害	(4)
1.3 发动机产品质量保证的重要性	(6)
1.4 发动机产品质量分析研究的意义	(6)
1.5 发动机产品质量分析的难度	(7)
1.6 发动机质量分析的主要方法	(8)
第 2 章 发动机两大机构零件失效分析	(11)
2.1 曲柄连杆机构零件失效分析	(11)
2.1.1 机体组零件失效分析	(11)
2.1.2 活塞连杆组零件失效分析	(13)
2.1.3 曲轴飞轮组零件失效分析	(15)
2.2 配气机构零件失效分析	(16)
2.2.1 气门组零件失效分析	(16)
2.2.2 气门传动组零件失效分析	(20)
第 3 章 发动机五大系统零件失效分析	(22)
3.1 供给系统零件失效分析	(22)
3.2 点火系统零件失效分析	(26)
3.3 冷却系统零件失效分析	(28)
3.4 润滑系统零件失效分析	(29)
3.5 有害物排放控制系统零件失效分析	(31)
第 4 章 发动机典型疑难失效分析案例	(33)
4.1 发动机机油消耗过高分析	(33)
4.1.1 现场试验分析	(34)
4.1.2 台架试验分析	(35)
4.1.3 道路试验分析	(36)
4.1.4 零件加工过程分析	(37)

4.2	发动机正时链条张紧器失效分析	(39)
<b>第5章</b>	<b>发动机产品质量分析策略</b>	<b>(42)</b>
5.1	系统理论分析法	(42)
5.2	发动机失效分析策略	(45)
5.2.1	确定失效分析地点	(45)
5.2.2	制定失效分析计划	(46)
5.2.3	执行失效分析计划	(47)
5.2.4	制定和执行改进措施	(48)
5.2.5	确认改进措施的有效性	(48)
<b>第6章</b>	<b>混合动力发动机的工作性能</b>	<b>(51)</b>
6.1	混合动力汽车的节能途径	(51)
6.2	发动机油耗的不确定性	(52)
6.3	串联式混合动力发动机的工作模式	(54)
6.4	混合动力发动机控制中存在的问题及解决方法	(55)
6.5	发动机试验重点研究的工况范围	(55)
<b>第7章</b>	<b>汽油机等压缩比理想循环模型</b>	<b>(58)</b>
7.1	LJ491QE1 汽油机示功图分析	(58)
7.2	汽油机等压缩比理想循环模型	(61)
<b>第8章</b>	<b>功率平衡方程</b>	<b>(66)</b>
8.1	机械损失的试验研究	(66)
8.1.1	机械损失的组成	(66)
8.1.2	试验研究	(67)
8.2	实际循环的功率平衡方程	(69)
8.2.1	汽油的燃烧效率	(69)
8.2.2	实际循环损失分析	(70)
8.2.3	功率平衡方程	(71)
<b>第9章</b>	<b>换气损失</b>	<b>(72)</b>
9.1	相关气体动力学基础	(72)
9.1.1	连续性假设和牛顿内摩擦定律	(72)
9.1.2	流体运动的描述方法	(73)
9.1.3	一维流动的雷诺输运定理	(74)
9.1.4	流体动力学基本方程	(75)
9.1.5	流体的可压缩性	(77)
9.1.6	总焓及总温	(78)
9.1.7	圆管内充分发展的不可压流体层流(定常)流动	(79)
9.2	换气过程相关的热力学基础	(81)
9.2.1	绝对压强、相对压强、真空度	(81)

9.2.2 能质、寂态、能质基准..... (82)

9.2.3 自发过程的条件、方向和限度..... (82)

9.2.4 势及状态坐标..... (82)

9.3 牛顿理想气流能量方程..... (82)

9.3.1 牛顿理想气流能量方程..... (83)

9.3.2 焓的本质..... (86)

9.4 LJ491QE1 汽油机排气损失的定量研究 ..... (86)

9.4.1 排气的气体常数  $R_{ge}$  的确定 ..... (86)

9.4.2 排气的定压比热容  $c_{p0}^e$ 、定容比热容  $c_{v0}^e$  和比热比  $k_e$  的确定 ..... (90)

9.4.3 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机排气特性的试验研究 ..... (92)

9.4.4 LJ491QE1 汽油机排气损失的定量研究 ..... (96)

9.5 LJ491QE1 汽油机进气损失的定量研究 ..... (98)

9.5.1 进气时气体常数  $R_{gi}$  的确定 ..... (98)

9.5.2 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机进气特性的试验研究 ..... (98)

9.5.3 LJ491QE1 汽油机进气损失的定量研究 ..... (101)

9.6 LJ491QE1 汽油机换气损失的定量研究 ..... (103)

第 10 章 混合动力车用汽油机效率模型 ..... (104)

10.1 汽油机的传热损失功率、时间损失功率，以及工质影响损失功率分析 ..... (104)

10.1.1 传热损失功率分析..... (104)

10.1.2 时间损失功率分析..... (105)

10.1.3 工质影响损失功率分析..... (106)

10.2 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机的效率模型 ..... (107)

10.3 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机效率的经验模型 ..... (114)

10.3.1 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机的排气流动分析 ..... (114)

10.3.2 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机的进气流动分析 ..... (115)

10.3.3 负荷特性下 LJ491QE1 汽油机效率的经验模型 ..... (115)

10.4 混合动力车用汽油机效率模型..... (117)

参考文献..... (120)

# 第一篇



## 发动机质量分析





# 第 1 章

## 汽车发动机质量



### 1.1 汽车质量现状

中国自 2001 年加入世界贸易组织以来，汽车工业发展迅猛，于 2009 年一跃成为世界第一大汽车产销国。我国汽车产量由 2006 年的 727.89 万辆上升到 2016 年的 2 811.88 万辆，汽车销量由 2006 年的 732.80 万辆上升到 2016 年的 2 802.82 万辆，年均增长率分别达到 15.30% 和 14.99%。2017 年，我国汽车生产 2 901.54 万辆稍售 2 887.89 万辆，分别同比增长 3.19%、3.04%。我国千人汽车保有量从 2006 年的 38 辆增加到 2016 年的 140 辆，截止到 2018 年末已达到 170 辆左右，基本完成了第一次普及。未来，新型城镇化战略的逐步推行、汽车更新换代的需求、不断增长的居民购买水平、整体较低的汽车普及率及区域发展的不平衡，将为我国汽车需求的稳健增长提供有力的保障。

中国作为一个巨大的汽车消费市场，自 20 个世纪 90 年代以来不断吸引国际各大汽车及零部件厂商以合资或独资等方式进入。为了抢占中国汽车消费市场的份额，各大汽车及零部件厂商竞相将科技进步带来的新技术不断地应用于其产品，产品可靠性的验证周期不断地被缩短，结果导致汽车及零部件的质量问题层出不穷。根据国家质量监督检验检疫总局公布数据：2017 年，我国各主要汽车产品生产者共实施缺陷汽车产品召回 251 次，召回缺陷汽车 2 004.8 万辆，在 2016 年的基础上同比劲增 77%，刷新年度召回数量纪录。同时，这也是自 2004 年我国实施缺陷汽车产品召回制度以来，年度召回缺陷汽车数量从最初的几万辆首次突破 2 000 万辆。加上 2018 年召回的 1 254.7 万辆，我国已累计召回接近 7 千万辆汽车。最新数据显示：仅在 2019 年前 2 个月，中国官方公布的汽车召回事件就高达 34 次。

分析召回事件，可知导致汽车产品质量问题的来源主要有两大类：一类是汽车厂商在前期的零部件研发和设计上存在先天的不合理，即零部件的设计缺陷；另一类是汽车厂商对某些部件的质量管理和控制出现了问题，例如零部件的加工、装配及材料缺陷等，这主要体现在供应链的管理上。此外，部分汽车厂商还可能为了降低生产成本，以提高其产品竞争力并扩大利润空间等，从而忽视消费者的身体健康，钻我国相关法律、法规的漏洞，主动采用廉价、有毒的原材料等。

## 1.2 汽车质量问题的危害

汽车产品质量问题不仅损害消费者的人身安全、经济利益、人格尊严和身体健康，而且损害汽车厂商的品牌形象和经济利益。

(1) 损害消费者的人身安全。汽车一般由发动机、底盘、车身、电气设备等四个基本部分组成，发动机由 2 大机构和 5 大系统组成，即曲柄连杆机构、配气机构和燃料供给系统、冷却系统、润滑系统、点火系统、起动系统。其中，燃料供给系统中的燃油、润滑系统中的润滑油、点火系统中的供电线路及器件，在存在质量问题的情况下可能引起车辆的自燃，危及消费者的生命。据不完全统计，2018 年，全球因存在自燃隐患而被召回的汽车数量超过 200 万辆，涉及 4 大著名汽车厂商。

(2) 损害消费者的经济利益。汽车从出现故障到确定为产品质量问题并实施召回，通常需要经历一个较为漫长的过程（相对于汽车的使用寿命而言）。这个过程中，生产厂商需要积累售后车辆的同一缺陷的样本数量，分析故障来源，制定改进措施等。部分消费者存在维权意识相对较弱、不堪故障来源确定的时间漫长、对产品质量问题的耐受性强等特点，往往放弃维权而导致个人的经济利益损失。例如：某品牌汽车发动机的正时链条张紧器因存在设计缺陷，在某些特定工况下会失效导致正时错乱，造成活塞与气门干涉而损坏发动机。得出上述问题的分析结论耗时 3 年多，时间不可谓不漫长；当时，上述汽车发动机总成的整车厂采购成本仅为约 1.5 万元人民币，经过整车厂、售后服务站等层层加价后，消费者更换发动机总成需要支付的费用约为 7 万元人民币，可见汽车产品质量问题给消费者带来巨大的经济利益损失。这样的原因使得部分消费者采用举横幅、堵大门、砸车等过激手段来进行维权。

(3) 损害消费者的尊严。汽车因产品质量问题召回在发达国家较为普遍，但是中国作为汽车消费第一大国，给全球各大汽车厂商带来巨大的销售利润的同时，在汽车产品质量问题的处理方面却并未受到公平对待。中国消费者对汽车产品质量问题的反馈甚至常常被敷衍和漠视，使消费者的尊严受到极大伤害。

(4) 损害消费者的身体健康。同发达国家相比，我国目前关于车内空气质量的法律法规尚不完备，仅在 2012 年 3 月 1 日由国家环保部和国家质量监督检验检疫总局联合发布了一个非强制性的《关于乘用车车内空气质量评价指南》。部分汽车厂商甚至利用我国关于车内空气质量强制性标准方面的空白，忽视消费者的身体健康而采用廉价、有毒的内饰材料，以降低汽车的生产成本，提高其产品的市场竞争力和扩大利润空间。然而，涉及汽车内饰件的产品质量问题往往对消费者的人身健康构成潜在威胁。例如，2013 年 3 月 19 日，中央电视台《每周质量报告》节目对有关车辆内部异味的问题进行了报道：某些品牌汽车的车辆阻尼材料使用沥青阻尼片，而在太阳暴晒及发动机散热作用下，紧贴钢板的沥青阻尼片因受热极易分解，会释放有毒、致癌的多环芳烃气体。阻尼片是附着于车身钢板内表面的一层黏弹性材料，起到减少噪声、振动的作用，即阻尼的作用。上述汽车采用的沥青阻尼片中的主要成分沥青是煤焦油或石油提炼后产生的残渣，因其含有多环芳烃及

硫、酚等多种对身体有害的物质，世界卫生组织下属的国际癌症研究中心（IARC）早在1976年就将煤焦油沥青列为一类致癌物质。据中国重汽技术中心材料工艺所高级工程师周光亚介绍：阻尼片紧贴在汽车钢板上，夏季经过太阳的暴晒，钢板的最高温度可能超过100℃，促使阻尼片老化的同时，阻尼片本身就可能进行分解而放出有毒的多环芳烃气体，而且这是一个长期缓慢的释放过程。多环芳烃中对人体影响最大的是苯并芘，它是一种突变原、致癌物质，也是一种脂溶性比较强的物质，如吸入到人体内，它会停留在肺黏膜上，可能引起肺细胞发生变异，这种变异到最后产生一些阴影或者肿瘤的变化，是一个漫长的过程。目前，汽车阻尼片一般都使用高分子树脂材料或者橡胶材料，这两种原材料都不会挥发有毒有害气体。某些汽车厂商之所以采用有毒的沥青而不采用树脂、橡胶等环保材料，一方面是因为我国目前没有关于汽车零部件和辅助材料的国家标准，另一方面则是因为使用沥青可以降低企业的生产成本。以普通的三厢轿车为例，其内部的阻尼片，如果以2毫米厚、大概使用3个平方米来算，采用沥青阻尼片的成本在50~70元，用环保材料的成本则在200~300元。2012年全年，涉事的三大品牌轿车销售总量约65万辆，仅使用沥青阻尼片一项，一年即可产生约1亿元的利润。

(5) 损害车企的品牌形象。通常，汽车因产品质量问题召回的日期相对于涉事汽车的首批生产日期普遍存在较长的滞后期（相对于汽车的使用寿命而言），该滞后期内消费者针对汽车故障的投诉不断增加，同时也增加了潜在消费者对该品牌汽车质量的质疑，影响汽车的销量。然而，汽车一般由2万多个零件组成，某个零件出现质量问题在所难免。翻开汽车召回的历史，世界车坛几乎每一款车型都有数量不等的召回记录，不管它多么负有盛名。主动召回是车企诚实品质的表现，是一种勇于负责的行为，值得称赞。汽车产品没有主动召回并不等于没有设计和质量上的安全缺陷和隐患，主动与被动的根本区别在于车企对待消费者的态度。积极主动地处理出现的产品质量问题，不会有损品牌形象，反而可能让车主更有安全感。持续关注旗下汽车产品的质量并及时有效地实施召回，无疑会提升车企的售后服务形象、体现车企的责任感，有利提高产品的市场份额。例如，2004年6月，某国内汽车公司主动向国家质量监督检验检疫总局递交召回申请，决定于6月18日开始与合资的国外汽车公司同步召回2002年12月26日至2004年3月25日期间生产的某型号轿车，进行燃油箱隔热件加装。此番事件使该国内汽车公司成为中国汽车召回制度的第一个“吃螃蟹者”，同时更成为尊重中国用户的先行者。

(6) 损害车企的经济利益。汽车因产品质量缺陷召回的实际运作通常由售后服务站完成，汽车厂商要支付售后服务站更换缺陷零件的材料和工时等费用。召回汽车的数量越大，汽车厂商需要支付给售后服务站的费用越多，相当于车企从其年度纯利润中拿出一部分资金支付用户的索赔，直接导致车企年度利润的下滑，经济利益受到损失。假设某品牌汽车的年销售量为10万辆，因出现产品质量问题而需要召回的汽车涉及2个年度的产品，每台车的召回费用以1000元人民币计算，不计其他费用，车企仅需要支付给售后服务站的费用就高达2亿元。可见，汽车产品质量问题对车企的经济利益会造成较大的损害，这也是部分汽车厂商对汽车产品质量问题采取回避、隐瞒、区别对待的主要原因。

### 1.3 发动机产品质量保证的重要性

发动机是汽车的动力源，是汽车各组成系统中最为重要的总成部件，其技术水平是整车技术水平的主要评价指标，其产品质量是衡量整车产品质量最为重要的指标。《2016年中国汽车产品质量指数报告》显示，在12大类（发动机、传动系统、冷却系统、变速器、进排气系统、电控燃油系统、行驶系统、制动系统、空调系统、转向系统、车身系统、电气系统）、197项二级指标中，冷却系统、行驶系统、转向系统三类系统故障率最高，这也正好对应百车故障数研究中“发动机”和“行驶过程”中问题的凸显。《2017年度汽车产品及服务问题投诉分析报告》表明，2017年汽车质量类问题投诉仍集中在发动机、变速箱以及车身附件及电器部分，其中发动机投诉问题15 545个，较2016年同期增加920个。某车企2012年亏损2亿元，其中用于支付发动机产品质量问题的索赔费用就高达6亿元，如果除去这部分费用，该企业能够实现盈利4亿元。可见，发动机产品质量保证对车企的生存至关重要。

### 1.4 发动机产品质量分析研究的意义

汽车发动机产品质量分析的对象通常是发动机生产、使用过程中失效的零部件。失效，是指零部件丧失其规定功能的现象，对可修复零件的失效通常也称故障。失效分析，是指分析引起零部件失效的原因并提出解决方法。工程实际中，进行发动机产品质量分析首先要收集对发动机工作异常的问题反馈或直接针对零部件的问题反馈，即提出问题；然后，分析引起这些问题反馈的零部件失效原因，即分析问题；最后，提出和实施解决上述零部件失效的措施，即解决问题；措施的有效性通过持续关注该措施实施后的一段时间内有无新增问题反馈来验证。因此，汽车发动机产品质量分析的实质是发动机的零部件失效分析。通过发动机产品质量分析可以做到以下几点。

(1) 为零部件的优化设计提供合理的实践依据。部分车企为了提高其产品的市场竞争力，不断将新材料、新技术等应用于发动机零部件的设计，并且为了尽快占据市场，往往主动缩短新型零部件的可靠性验证时间，使得存在先天设计缺陷的产品流入市场。通过零部件的失效分析可以发现这些先天设计缺陷，为研发人员优化零部件的设计提供实践依据。

(2) 为优化零部件的生产工艺提供合理的实践依据。发动机零部件的加工工艺和发动机的装配工艺不是一成不变的，且需要根据加工、装配等条件的改变加以调整。通过对发动机失效零部件的分析，可以发现因生产工艺缺陷导致的零部件失效问题，为生产管理人员优化发动机零部件的生产工艺和发动机的装配工艺提供实践依据。

(3) 促进车企消化吸收引进的新技术、新设备。对于因加工或装配设备失效引起的零部件缺陷，通过发动机产品质量分析可以促进工程技术人员对引进设备新技术的消化吸

收，有利于提高车企的工艺水平。

(4) 有利于提高售后服务部门的工作效率。对于来源于售后的发动机失效问题反馈，通过将发动机产品质量分析的结果反馈给售后服务部门，可以避免售后服务部门对发动机失效问题反馈的盲目工作，提高其工作效率和保证售后服务的质量。

(5) 为制订或修订相关标准、规范等提供依据。发动机产品质量分析结果可以作为国家相关部门制订或修订标准、规范等的实践依据。例如：通过对于发动机机油消耗量过高的分析，车企可制订相应的测量标准，这一标准可以作为国家相关部门制订相应标准或规范的参考。

此外，发动机产品质量分析还可以为正确处理现场问题、为国家及行业制定科技发展规划等提供依据。

## 1.5 发动机产品质量分析的难度

汽车发动机产品质量分析对于从业人员的理论和实践水平要求较高。此外，分析对象的相关因素也导致分析难度大，主要包括以下几点。

(1) 汽车发动机的工作环境和工况复杂，失效时的相关信息收集困难。部分消费者由于存在惧怕提供的信息对自己索赔不利的心理，往往提供虚假信息，使得收集到的信息准确性也难以确定。例如，2010年某品牌汽车出现多起关于活塞“烧顶”的问题反馈，分析人员反复与相关车主沟通以获取发动机的工作环境和工况等相关信息时，车主却多次对同一问题作出截然不同的回答，这无疑增大了分析人员的工作难度。

(2) 作为几百个零部件的总成，汽车发动机的失效通常表现为多个零部件的损坏，各零部件之间相互关联，同时各零部件或同一零部件的失效模式也不尽相同，失效分析涉及的领域广，导致分析失效原因的难度大。例如，2011年某品牌汽车出现多起发动机连杆瓦“滚瓦”的问题反馈，同时损坏的零件有曲轴、连杆、连杆瓦等，导致“滚瓦”的缺陷可能源于曲轴、连杆、连杆瓦、连杆螺栓、润滑油、冷却系统等部件或系统，无形中增大了分析难度。

(3) 分析时限短。汽车发动机产量大，一般年产量超过10万台，所以对于出现的产品质量问题需要尽快分析出原因并提出解决措施，避免更多的发动机“带病”出厂、增加召回成本和对消费者的损害，也使得发动机分析人员的工作压力较大。

(4) 失效零件由于燃烧、氧化、腐蚀、磨损、粉碎等失去原貌，也是导致失效分析难度较大的一个重要因素。例如，2011年某品牌汽车出现多起发动机活塞粉碎的问题反馈，发动机3#缸活塞、活塞环完全粉碎，3#缸连杆小头孔断裂、活塞销及衬套断裂变形，4#缸连杆断裂，各气缸内部均有不同程度的损坏。零件失去原貌，一方面意味着不能采用尺寸测量的分析手段，另一方面意味着失效零件的缺陷部位的查找难度增大。此外，发动机的大部分零部件通常来源于外协采购，由于零部件供应商担心因索赔带来经济利益损失，针对这部分外协零件的质量问题分析往往得不到供应商的积极配合，使得分析难度增大。发

动机分析工程师在处理外协零件的产品质量问题过程中，常常会遇到供应商以各种理由拒绝提供专用的检测设备、产品的设计图纸和生产工艺等，并声称该外协零件不存在质量问题。然而，发动机分析工程师完成该零件的分析工作后却发现，供应商早已深知自己的产品质量问题并已经完成整改。

## 1.6 发动机质量分析的主要方法

### 1. 系统工程分析法

汽车发动机是由多个零部件组成的总成，其产品质量分析可以采用系统工程解决问题的思路和方法，如故障树分析法、失效模式及后果分析法、特征-因素图分析法、事件时序树分析法、失效模式与后果及致命度分析法、失效的模糊数学分析法、系统失效统计分析法等。目前，汽车发动机产品质量分析领域中应用最为广泛的系统工程分析法是特征-因素图分析法，又称为鱼骨图分析法。

鱼骨图分析法由日本管理大师石川馨发明，它是一种发现问题根本原因的方法，鱼骨图又称为“石川图”或者“因果图”。鱼骨图分析法的特点是简捷实用、深入直观，将问题或缺陷（即后果）标在“鱼头”外，在鱼骨上画出“鱼刺”，并在“鱼刺”上按出现几率列出产生问题的可能原因。鱼骨图有助于说明各原因之间如何相互影响，也能表现出各可能原因是如何随时间而依次出现的，有助于着手解决问题。鱼骨图分析法的使用步骤：①查找需要解决的问题；②把问题写在鱼骨的头部；③召集相关人员共同讨论问题出现的可能原因，尽可能多地找出问题；④把问题分组，在鱼骨上标出；⑤根据不同问题征求相关人员的意见，总结出正确的原因；⑥拿出任何一个问题，研究为什么会产生这样的问题；⑦针对问题的答案再问为什么；这样至少深入五个层次（连续问五个问题）；⑧当无法继续深入提问时，列出这些问题的原因，而后针对每一个原因列出多个解决方法。

图 1-1 为应用鱼骨图分析法分析某品牌汽车发动机曲轴“抱死”的原因的实例。该图中的“鱼头”表示需要解决的问题，即发动机曲轴“抱死”。根据现场调查，可以把导致曲轴“抱死”的原因概括为 6 类，即连杆、曲轴、发动机、装配、汽缸体和连杆颈，在每一类中包括若干造成这些原因的可能因素，主要包括：①人（man）的因素，包括操作者对质量的认识、技术熟练程度、身体状况等；②机器（machine）的因素，包括机器设备、工夹具的精度和维护保养状况等；③材料（material）的因素，包括材料的成分、物理性能和化学性能等；④方法（method）的因素，包括加工工艺、工装选择、操作规程等；⑤测量（measurement）的因素，包括测量时采用的方法是否标准、正确等；⑥环境（environment）的因素，包括工作地的温度、湿度、照明和清洁条件等。这 6 类因素也称为引起质量波动的“5M1E”，将它们与上述 6 类原因分别以鱼骨分布态势展开，即形成如图 1-1 所示的鱼骨分析图。

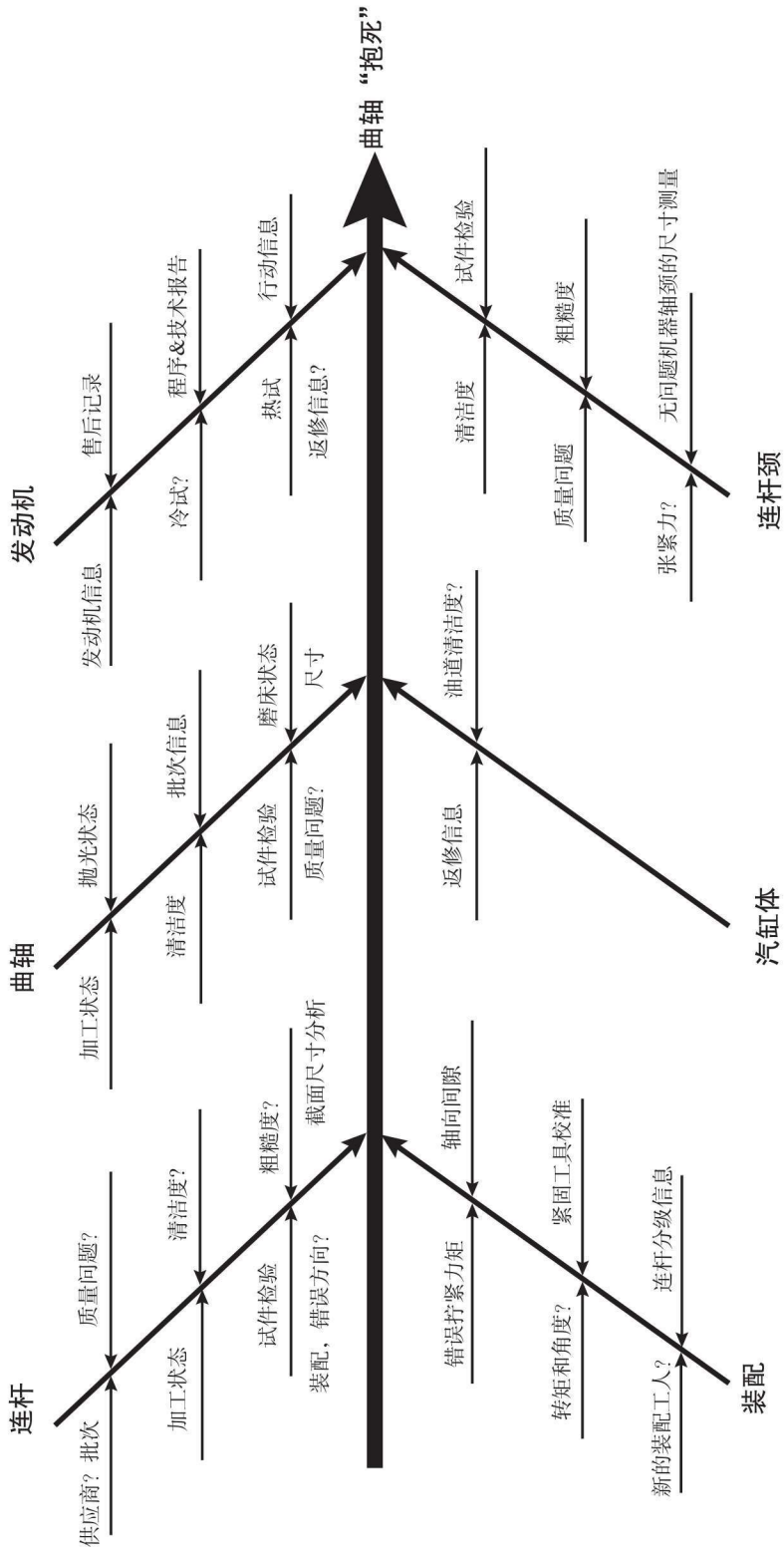


图1-1 鱼骨图分析法应用于某牌汽车发动机曲轴“抱死”原因分析