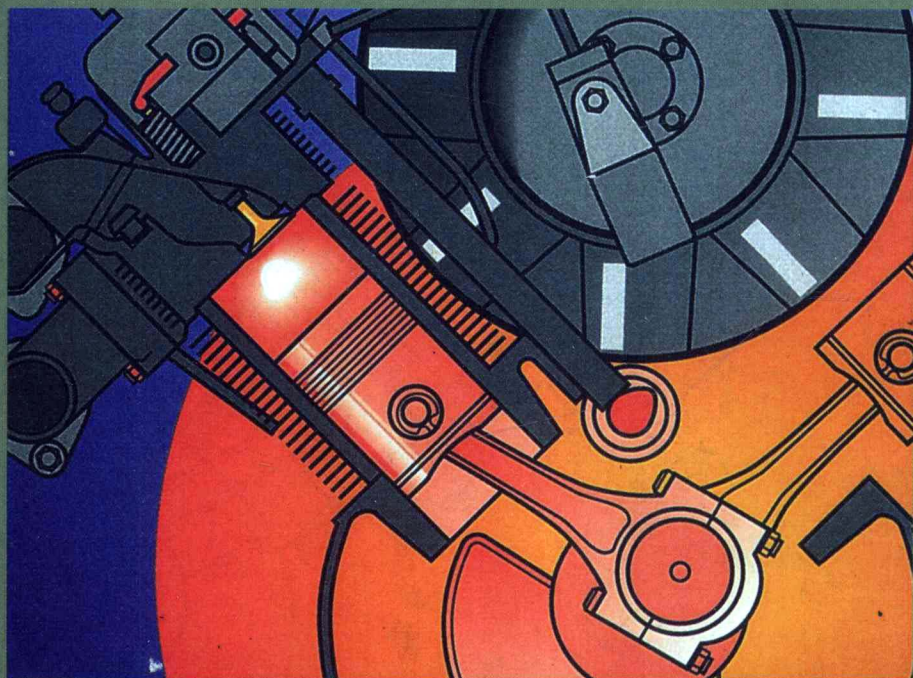


恩斯特·哥劳特 工 程 师
斯提芬·吉 马 教授博士

发动机损伤及其原因



·内部资料·

发动机损伤及其原因

恩斯特 哥劳特 工程师
斯提芬 吉马 教授 博士 著
张世莹 译
吴吉湘 译校

中国第一汽车集团公司技术中心
科技信息部编制

前 言

为了印证这个题目的现实性,有必要对本书的第一版进行改版。因为恩斯特·哥劳特工程师已经去世,Vogel 出版社请我对本书进行修订,补充和进一步现实化。我愿意满足出版社的这个愿望。

因为随着时间的进展,发动机变得更加可靠和寿命更长,现在发动机的损伤已经保持在一定的范围之内。在这本书里涉及到损伤原因和人们如何设法去补救。所有与发动机损伤有关的部门可以从中得到可能出现损伤的情况,背景及其原因。而且对发动机损伤研究的纯粹“理论家”也是有益的,因为很明显与“Palmstroemschen-格言”相反,“什么是不允许存在的,也有可能存在”。

发动机损伤是多层次、相互关联和互相依赖的影响因素、条件和原因的结果。为了正确分析从中找出原因和补救措施,必须知道发动机部件的结构,它是如何工作的和它的功能与其他部件有什么关系,以及它又是怎样影响其他部件的。因此将结构和最重要发动机部件的功能以及对损伤进展起重要作用的物理和技术功能共同进行叙述。只有当人们有了在发动机内发生了什么和在什么条件下发动机必须工作的概念,才能知道发动机的状况和由此产生的障碍和损伤。

想象中可以将机器部件的损伤编排成原因和现象的一个矩阵。显而易见,不仅各种发动机部件有可能出现同样的损伤类型,而且在同一个部件上也有可能出现完全不同的损伤。如同同一种原因可以引起不同的损伤一样,同一种损伤类型可以有不同的原因。为了得到比较好的概况,将最重要的损伤机理编排在一起。其中涉及到功能组件和部件的典型损伤,此外还介绍了对于损伤过程或者损伤情况很有启发的特殊例子。

本文的照片资料有不同的质量,损伤部件常常对比度比较小,色标大多处于浅灰和深黑之间,而且损伤照片常常是在现场不理想的照明条件下用摄影幕完成的。然而在实验室内照的照片质量是非常好的,而且照片常常具有惊人的美学吸引力。为了维护作者的匿名权,很多照片没注明来源。

第一版主要叙述了汽车发动机的损伤。这一版将内容进一步扩展,还叙述了通用发动机(重型载重汽车、有轨车辆、发电机、工程机械以及船用发动机的传动装置)。一方面考虑了实际情况,另外一方面汽车发动机在通用发动机中曾经是技术领先的,而且还继续领先。人们只考虑了增压,增压空气冷却,4气门技术等。因此这些发动机的问题和损伤同样也有可能在汽车发动机上出现。

新补充的是 1 至 5 章以及 6.2.6 和 6.8 节。删除了柴油发动机调节器,以及离合器的详细叙述。

本文的基础来源于实践经验。因此第一版的作者恩斯特·哥劳特工程师以相应的资料和文献为依据。在这里我感谢为本书提供信息(还有损伤部件)资料的公司和研究机构。特别要感谢的是与他们的同事提供信息的谈话和指导。

我的感谢同样适用于吉森·弗里德贝格技术大学的大学生们所作的极其细心搜集的有意思的损伤材料。感谢我夫人阿雷娜的理解和耐心以及用 CAD 制作的描述和图表。

斯提芬·吉马

目 录

1 引言	1
2 发动机	6
2.1 性能和特点	6
2.2 运转条件	7
2.2.1 发动机结构方案	7
2.2.2 发动机功率和功率降低	10
2.3 发动机的运转性能	14
3 损伤:定义及概念	35
4 损伤原因	40
4.1 磨损	40
4.2 技术缺陷(产品缺陷)	40
4.2.1 设计缺陷(规划错误)	40
4.2.2 材料缺陷	44
4.2.3 制造缺陷	44
4.3 运转故障	44
4.3.1 超负荷	44
4.3.2 运转条件改变	45
4.3.3 误操作	46
4.3.3.1 磨合	46
4.3.3.2 冷起动	46
4.3.3.3 长时间空运转	46
4.3.3.4 运转介质缺陷和使用不适当的运转介质	48
4.3.3.5 外部作用	48
4.3.3.6 技术进步	48
4.4 人作为损伤的原因	49

5	损伤说明	51
5.1	损伤类型	51
5.1.1	由于机械负载引起的损伤	51
5.1.2	过载折断	53
5.1.3	振动折断	53
5.1.4	热负荷引起的损伤	58
5.1.5	水性介质中的腐蚀引起的损伤	61
5.1.6	摩擦引起的损伤	63
5.2	损伤分析	71
5.2.1	现场参观	71
5.2.2	损伤部件的安全性	72
5.2.3	取得机器设备重要的损伤数据	72
5.2.4	损伤过程	72
5.2.5	对损伤的准确描述	74
6	发动机损伤	76
6.1	概况	76
6.2	驱动装置的损伤	82
6.2.1	活塞	82
6.2.1.1	裙部区域的损伤	93
6.2.1.2	在活塞环区域和第一道环到 顶面的高度区域的损伤	111
6.2.1.3	活塞头部的损伤	123
6.2.1.4	力传递区和活塞销轴承区的损伤	143
6.2.2	活塞环	155
6.2.2.1	装配误差	160
6.2.2.2	烧焦痕迹形成	162
6.2.2.3	活塞环颤动	163
6.2.2.4	活塞环折断	164
6.2.2.5	活塞环卡住	164
6.2.2.6	高机油消耗	165
6.2.3	连杆	165
6.2.3.1	制造误差	171

6.2.3.2	磨损腐蚀	173
6.2.3.3	装配错误	175
6.2.3.4	发动机运转引起的损伤	176
6.2.4	曲轴	177
6.2.4.1	损伤原因	182
6.2.4.2	曲轴的损伤	182
6.2.5	驱动装置轴承	190
6.2.5.1	轴承损伤	205
6.2.5.2	磨损	207
6.2.5.3	脏东西	212
6.2.5.4	疲劳(振动折断或者疲劳折断)	217
6.2.5.5	气蚀(穴蚀)	218
6.2.5.6	侵蚀	224
6.2.5.7	腐蚀	224
6.2.5.8	电流通过	224
6.2.5.9	制造错误	227
6.2.5.10	轴承几何形状的不规律性	231
6.2.5.11	边缘磨损	232
6.2.5.12	梳状磨损	237
6.2.5.13	表面磨损	237
6.2.5.14	轴瓦固定配合不充分	239
6.2.6	发动机油	245
6.3	曲轴箱及安装部件	255
6.3.1	曲轴箱	255
6.3.2	曲轴箱的损伤	259
6.3.2.1	小裂纹、划痕和疲劳折断	259
6.3.2.2	过载作用引起的折断	259
6.3.2.3	磨损、材料去除	261
6.3.3	气缸、气缸套筒和气缸圆周表面	261
6.3.4	气缸的损伤	269
6.3.4.1	磨损	269
6.3.4.2	楔形磨损	270
6.3.4.3	粘着磨损	270

6.3.4.4	磨粒磨损	270
6.3.4.5	划痕	274
6.3.4.6	咬合	274
6.3.5	气蚀	275
6.3.5.1	缝隙气蚀	277
6.3.5.2	裂纹和折断	277
6.3.6	气缸盖	279
6.3.7	气缸盖的损伤	282
6.3.7.1	气门座的磨损	282
6.3.7.2	裂纹和折断	282
6.3.7.3	侵蚀和腐蚀	284
6.3.7.4	气缸盖底面弯曲	285
6.3.7.5	气门导管磨损	285
6.3.7.6	气缸盖密封的不密封性	287
6.3.7.7	气缸盖电热塞螺纹和火花塞 螺纹以及喷嘴座漏气	288
6.4	控制系统	288
6.4.1	气门弹簧	291
6.4.2	气门	295
6.4.3	气门损伤	300
6.4.4	凸轮轴和凸轮摇杆	310
6.4.5	皮带、链条和齿轮驱动	314
6.4.5.1	三角皮带	315
6.4.5.2	齿形皮带	318
6.4.5.3	链条传动	321
6.4.5.4	齿轮	328
6.5	喷油系统和点火	332
6.5.1	柴油发动机的混合气形成和燃烧	332
6.5.2	喷油系统	343
6.5.3	喷油系统的损伤	355
6.5.3.1	喷油泵	355
6.5.3.2	喷油嘴	359
6.5.3.3	喷射管路	366

6.5.4	电热塞	368
6.5.5	奥托发动机的点火和燃烧	372
6.5.5.1	奥托发动机的燃烧	372
6.5.5.2	点火和火花塞	376
6.5.5.3	火花塞损伤	382
6.6	过滤器	386
6.6.1	过滤器的基础原理	386
6.6.2	空气过滤器	391
6.6.2.1	干燥空气过滤器	392
6.6.2.2	油浴空气过滤器	393
6.6.3	油过滤器	398
6.6.4	燃料过滤器	409
6.7	换热器	411
6.7.1	管式热交换器	416
6.7.1.1	平面管式或片式热交换器	416
6.7.1.2	平板式热交换器(堆积片式热冷却器)	416
6.7.2	传热器的损伤	419
6.7.2.1	淤积	419
6.7.2.2	气蚀	420
6.7.2.3	作为设计条件和安装条件引起的损伤	420
6.7.2.4	材料和制造条件引起的损伤	420
6.7.2.5	不适当运行条件和维护错误引起的损伤	420
6.7.2.6	由于改变运行条件引起的损伤	424
6.7.2.7	腐蚀	426
6.7.2.8	机械损伤	430
6.8	排气增压发动机	432
6.8.1	透平增压器损伤	438
6.8.1.1	材料缺陷	438
6.8.1.2	异物影响	439
6.8.1.3	不平衡	441
6.8.1.4	侵蚀	442
6.8.1.5	断裂	442
6.8.2	润滑剂不充分	444

6.8.2.1	油脏	444
6.8.2.2	缺油	445
6.8.2.3	油积炭形成	446
6.8.2.4	漏油	447
6.8.3	箱体不密封	448
6.8.4	ATL(增压器)在零压力区运转	448
6.8.5	对噪声不满意	448
专业技术术语目录		456
缩写字		502

1 引言

100 多年以前已经有了发动机,在这 100 多年时间里制造了上亿台发动机。因此人们可以想象对发动机技术已经掌握到不会或者几乎不再出现损伤的程度,然而实际情况却是另外的样子。发动机发展的特征 is 比其他机器可能出现更多各种类型的损伤情况。例如与电机毫无问题工作相比较人们不能摆脱这种印象,发动机具有原则的、系统固有的缺陷,虽然自从一个世纪以来在世界范围内总是有非常多的工程师、技术员和技术工人在发展和改进发动机方面进行工作。关于发动机及其部件的损伤,就是说什么使内燃机这样容易出现故障和损伤,这些原本应该已经在书籍、杂志、甚至标准中发表过了的。

究其原因在于发动机的本质,发动机功能的复杂性以及非常多的几乎通常不能忽略的影响因素和发动机必须在各种不同运转条件下运转。

内燃机是一种自给自足的动力机械,这种动力机械将存在于燃料中的能量转换为热能,并且将其中的一部分转换为机械能。其他机器类型为了达到同样的效应需要燃烧、锅炉、冷凝器和透平机,而这些部件的整体不允许大于发动机的大小。

因为热转换、燃烧是在发动机内进行的(“内部燃烧”),驱动装置的精密部件直接受到燃气及其腐蚀的和剥离的燃烧产物的冲击。气缸内高燃气压力是发动机功率和效率的先决条件,而高燃气压力必须借助于移动的密封活塞环来维持,移动密封功能的先决条件是流体动力润滑。流体动力润滑在死点上被瓦解,这时活塞环在点火 OT(上死点)必须克服高燃气压力和高燃气温度。此外,活塞环必须将活塞上出现的大部分热排出到气缸壁上。多数活塞是用熔点略低于 600°C 的铝合金制造的,比高于 2000°C 的燃烧室温度低很多。由于驱动装置的滑动副偶件,活塞和气缸的材料性能具有不同的热膨胀,必须在结构和运转上将这些进行平衡。轴承上力的传递是通过只有千分之几毫米的油膜完成的。重要的发动机部件受到高温和高机械负荷并且加上高磨擦负荷的作用。

发动机是由很多零件构成的,这些零件必须在结构和功能上相互联系无故障地工作。这些零件在其方面受到整体上常常无法控制的很多作用和影响,而且制造厂的开发工程师对其只有很少影响。发动机只是链条上的一部分,这个链条不可能比它最薄弱的环节强。发动机附件,力传递,汽车或者船的结构和运转的缺陷反作用在发动机上。因此发动机损伤常常是整个驱动装置和被驱动机器的缺陷,薄弱环节和误操作的标志。

发动机的外部运转条件并不比内部好多少,汽车发动机没有坚固的基础,汽车车架和自支撑车身的变形,发动机连续承受振动和重的撞击。由于起伏波浪或船的负载情况使得软的船机座变形,并且可以导致轴承损伤,甚至曲轴折断。在一天时间和一年时间内发动机受外部温度变化的影响,它们工作在北极地区极端寒冷和沙漠地区灼热的所有气候条件下。人们几乎不可能指望另一种机器类型能连续地、突然的负载变化,冷启动快速加载到全负荷,突然卸载,空运转时间长,在发动机温度低的情况下停车,起步和运转、超负荷和在满负荷情况下停车。

其他问题是由于低质量的燃料,当空气、燃料和润滑油不充分过滤时夹杂的灰尘、砂子或者空气中的湿度和盐份,冷却液维护不充分,缺乏维护和技术质量低工作人员的操作。人们可以想象如何在这样的工作条件下管理一台机床、纺织机和包装机。

发动机发展的各个重点阶段:

- 提高发动机总功率
- 提高发动机单位功率(功率/质量;功率/升量;功率/体积)
- 降低燃料和润滑油的消耗,也就是说改善效率
- 降低制造成本
- 提高寿命和延长保养周期
- 简化维护和修理
- 减少有害物质排放和减少噪声

所要求的措施其中一部分是互相排斥的,因此必须总是根据各自的重要性进行妥协,这些妥协由其各种具体的要求来取舍。

现在的发动机比起从前来是由明显少得多的部件组成的。原因是功能的集成、廉价、排除损伤来源、简化维护和修理,还有将机械转化为电子(混合气形成、点火、调节)整个功能范围的转化。与上述事情同时发生的是发展成比较高的机械、热和磨擦负荷,这些必须用比较小的截面和质量来承受。开发周期总是在缩短,在开发时,对制造和运转经济性以及运转不能充分考虑不允许出现功能缺陷、故障或损伤。

如果知道了一种损伤类型的原因并且已经将其排除,这样就可将功率、运转状态和寿命的要求提高,但这将重新引起新的损伤。情况就如同龟兔之间永无休止的赛跑一样!此时根据发动机的发展阶段,薄弱环节在变化,轴承、活塞和活塞环;曲轴、喷射装置、气门和气门弹簧;气缸盖和气缸盖密封总是容易出故障的部件,几乎没有一种功能组件不会由于它出现问题而阻碍发动机的进

一步发展。人们在发动机进一步发展上总是被迫碰到按照现有技术可以实施的极限,正是这样发动机的进一步发展成为故障和损伤的原因。

发动机损伤是由单个部件和单个部件的各种组合中出现的物理、化学和电化学过程很大范畴上进行解释的。因此发动机损伤大多数不只有一个,而是有比较多的原因,它们每个单独出现几乎是不可预见的,它们的组合更加是偶然性的,于是它们出现了并且造成了损伤。如同求证 MURPHYs 法则一样:“如果可能失败的话,那肯定失败!”。因此损伤原因常常是不直接的现象,一种损伤同时“围绕着 3 个角”发展,这给寻找原因造成非常大的困难。

评价损伤的问题是,是否一个大零件(例如曲轴)或者一个小零件(例如轴承、活塞环)造成停机,后果是发动机停机。损伤可以是雪崩式发展:活塞环咬住,活塞咬住,驱动装置损伤,发动机停止。到目前为止后果是悲剧性的,一种损伤的程度常常与其原因不成比例。

机器部件上的损伤对于发展总是一个集合(而且现在也是这样),不应该忽略指出在材料、设计、制造、装配和操作上的薄弱环节和故障。此外还应该指出整个机器设备在结构或运转上的故障。通过对损伤采取措施第一位的是通过排除其原因以便将来排除损伤。过去这种《积极的》损伤预防措施常常是不可能的,因为不能明显地澄清这些原因,为什么这些原因总是不能够受到影响。于是人们必须满足于降低一种弊病的作用并且使之能够忍受:《被动的》损伤预防措施。

由于这些原因,损伤在发动机的发展上起着决定性的作用,人们从中学习,从损伤中变得聪明了。也进一步尝试在开发中有目的地制造损伤,以便利用所得到的知识在发动机运转时排除损伤。

由于大家理解的原因,人们争取在发动机的方案阶段、设计阶段和试验阶段消除所有损伤的可能性。这将遇到已经叙述过的困难,说明了为什么在超过 100 多年之后发动机发展和发动机制造还是会出现损伤:

- 我们对于物理和技术过程的知识有限现在也还是这样。

- 另外一方面知识和经验的增加导致了强化的轻结构,比较大的发动机磨损和廉价的制造,这些都成为某些损伤的原因。

- 新开发和进一步开发的实质是,人们超越了已经熟习知识的界线和进入了技术的新领域。

- 很多情况的偶然相遇,每个单个的曲轴是无害的,但是它们在一起却产生损伤,这原本只是很少可能的,此外影响因素有很多组合的可能性,率先将它们排除的试验实际上是不可能的。

●不能完全排除人们在发动机制造、装配、运转和维护中的不充分性,即使尽了所有的努力。

●必须用可以承受的,也就是说可以支付的费用开发和制造发动机,由于成本原因,人们不可能将开发进展到在技术上是可能的和值得期待的程度。成本压力不仅在发动机技术方面,而且在很多方面与创造性是对立的。

●开发时间已经明显缩短。必须更多地尝试计算机模拟和代替场地试验,这在很多情况下是可能的但并不适用于所有的情况。

●用比较少的人员作更多的工作,这迫使极端地集中为“白天工作”。对于中等重要的工作,例如损伤及其原因和补救措施的详细记录常常缺少人员和时间,特别是在重要的开发时也是这样的所谓《穿过花园篱笆向外看》。因此流失了经验和技术分析也受到了限制,不是选择最好的,而是下一个能够快速实现和选择似乎是最便宜的解决方法。

●由于在开发、制造和发动机运转的所有领域,过早地放弃比较老的、有经验的工作人员,使经验流被中断。

如果又出现长时间以来已经知道了原因的损伤,由于精简和合理化的原因其补救措施被废止,因为新一代工程师和技术员对此并不熟悉。

然而在开发方法方面,几十年的经验和掌握得比较好的仪器设备已经导致,说明发动机承载能力界限的那些损伤,很少在发动机操作人员上出现,他们在实验室工作和在一段时间里,通过经验和理论的预开发预先了解了。如果人们考虑大多数发动机工作时间多么长和多么可靠,严格说来发动机损伤是有限的。

发动机损伤的带宽很宽,它从由于外部作用(图 1.1)和由于内部误操作引起的(图 1.2)不再可以修理的完全损伤,经过所有中间阶段直到几乎看不见的表面承压图和磨损图。

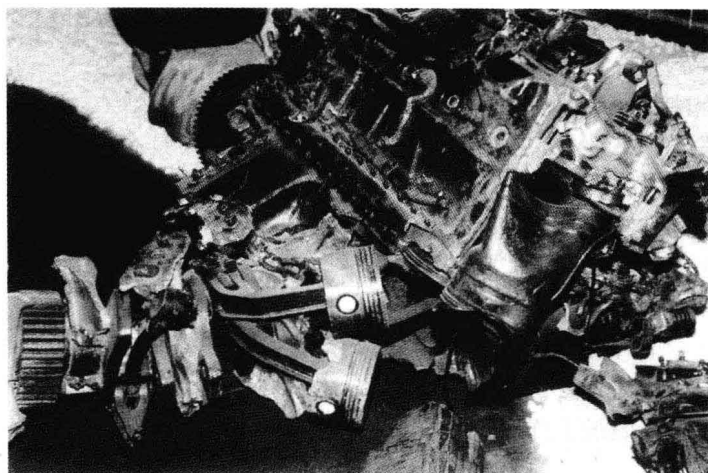


图 1.1 从超过 1000 米高空摔下来的飞机发动机的完全损伤(汽车和技术博物馆 Sinsheim)



图 1.2 活塞咬住后果造成发动机完全损伤

这本书的内容只包括技术性损伤,不包括由于外界暴力影响引起的损伤,不是由于有意的车祸或者是由于有意的战争过程引起的。

2 发动机

2.1 性能和特点

关于发动机产生驱动力的机器，通俗地被理解为具有内部燃烧的活塞式热力机械(DIN 1940)。

发动机的特点是用往复运动活塞结构形式的内燃机(见图 2.1)：

- 变化的工作空间
- 内部燃烧
- 不连续的(断续的)物质流量
- 小的物质流量
- 高压和高温的工作气体

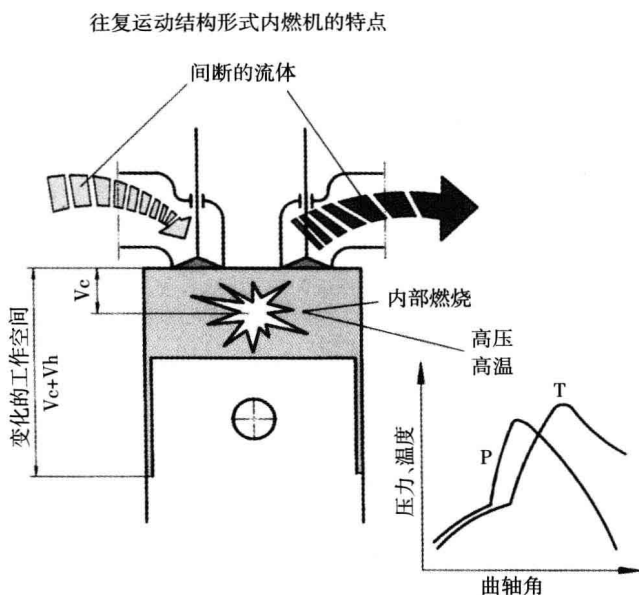


图 2.1 内燃机的特点(简图)

这些特征奠定了内燃机原则上的优点同时也奠定了它的缺点。

其优点是：

●高效率 这是建立在高温和高压基础上的，在这种情况下发动机内产生热动力过程，但这也是很多发动机损伤的原因。奥托发动机的有效效率为 35%，而柴油发动机为 40%~55% 之间(后者是大的 2 冲程柴油发动机)。内燃机在原理上是部分载荷时还有好的效率。因为与流体机械不同的是活塞机械的

运转性能与转速没有关系。

●内燃机可通过转速/扭矩的分级覆盖一个大的功率范围。最小的发动机飞机发动机和汽车模型的功率小于 0.07kW,船用和固定应用的发动机功率直到 66000kW。小的发动机其功率产生主要是经过转速;大的是经过扭矩。

内燃机原则上的缺点是不连续的工作方式,由于往复运动活塞驱动装置的机构学(运动过程),由于惯性作用(惯性力和惯性扭矩)和由于间断的(短时中断的)质量流量而限制了发动机的功率。另外一方面这些缺点是内燃机功能的前提,因为不连续的工作方式只有当温度峰值至少超过 2000°C 时才使发动机运转高效率成为可能。

在发动机内的能量转换是通过各种相互联系的过程完成的。

- 换气
- 混合气形成
- 燃烧
- 力传递
- 热传导

发动机是相互起交替作用技术部件的复杂系统,其效应是建立在热动力、流体技术、机械动力、磨擦学和调节技术过程基础上的。这些过程是通过功能部件起作用的:

- 具有气缸、气缸盖和油底壳的曲轴箱
- 驱动装置:活塞连同附件,曲柄、曲轴、轴承润滑剂
- 控制系统:凸轮轴、顶杆、气门摇臂、气门、润滑剂
- 混合气形成:喷射装置(柴油/奥托)、汽化器(奥托)
- 冷却系统:热交换器、泵
- 空气、燃料和润滑剂的过滤器
- 调节器
- 齿轮、链条和皮带驱动

每个功能组件是由部件、活塞、活塞环、轴承、曲轴、凸轮轴、气门等构成的,在其上作为链条的最后环节出现损伤。

2.2 运转条件

2.2.1 发动机结构方案

发动机是多种多样的,有很多不同的结构形式。这些结构形式由于大小、结构类型、用途、功能方式和运转状态是非常不同的,而且在本书题目的意义上损伤的类型和频繁程度也是不同的。决定发动机设计的是用途,然后按照顺