

小型风冷柴油机的关键技术

■ 杨建华 著

KEY TECHNOLOGY
OF SMALL AIR-COOLED DIESEL



國防工業出版社

National Defense Industry Press

小型风冷柴油机的 关键技术

杨建华 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

小型风冷柴油机的关键技术 / 杨建华著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 07537 - 3

I. ①小… II. ①杨… III. ①风冷柴油机 -
技术 - 研究 IV. ①TK429

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 153809 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 176 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前言

与同类水冷柴油机相比,小型风冷柴油机具有易于实现轻量化、工作可靠、适应性强、制造维修方便的优势,但存在着热负荷高、充量系数低,以致相应的平均有效压力低 5% 左右的缺陷;与小型汽油机相比,小型风冷柴油机具有燃油消耗率低、工作可靠、耐久和维修次数少的特点,但其外形尺寸与净质量大 $1/3$ 左右,这又是广大用户希望改进的。

为了使小型风冷柴油机在性能方面能与强化的水冷柴油机相抗衡,在轻量化方面又能与汽油机相媲美。多年来,作者在研制高强度、轻巧型、高性能 155F、SC165F、BH170F、175F 等单缸风冷柴油机,开发小型风冷万能单缸试验柴油机,小型风冷柴油机万能试验风扇,内燃机万能试验凸轮轴,以及风冷柴油机性能提高的专题试验研究过程中,提出了小型风冷柴油机的发展方向与研究方法,开发了高强度轻巧型单缸风冷柴油机高机械效率、高充量系数、优化冷却系统、优化燃烧系统、易起动、低噪声与变型双曲函数配气凸轮等关键技术,应用广泛,取得了良好的经济效益。现将其整理出版,供广大读者参考,以促进我国小型风冷柴油机的技术进步与发展。

我国幅员辽阔,有大面积山区、丘陵和沙漠等缺水地区,气候条件差异大,在很多情况下使用风冷柴油机更为适宜。随着社会现代化的发展,对各种用途的小型风冷柴油机的需要量将不断增加。

本书第5章中导风装置的设计与优化由邵阳学院唐维新教授撰写,全书由邵阳学院袁文华教授进行一审,大连理工大学隆武强教授进行终审。陈小双同志绘制了部分图样,许颖同志对全书进行了认真校对,对他们的大力支持深表感谢。本书出版得到湖南省高等学校《动力机械及工程》重点建设学科与湖南省教育厅《小型风冷柴油机关键技术研究》科研项目的资助。

由于作者水平有限,恳请读者不吝指正。

杨建华

2011年4月

目 录

第 1 章 小型风冷柴油机的发展与研究	1
1.1 小型风冷柴油机的特点	1
1.2 小型风冷柴油机的发展方向	5
1.3 小型风冷柴油机的研究方法	11
参考文献	17
第 2 章 高机械效率的先进技术	18
2.1 柴油机机械损失的组成	18
2.2 柴油机机械损失的估算	19
2.3 高机械效率的技术措施	22
2.4 机械损失功率的测定	36
参考文献	40
第 3 章 高充量系数的试验研究	42
3.1 影响充量系数的因素分析	42
3.2 提高充量系数的技术措施	51
3.3 四冲程柴油机充量系数的测定	62
3.4 CZ175F 柴油机充量系数的试验研究	64
参考文献	68
第 4 章 变型双曲函数配气凸轮型线研究	69
4.1 现有理论与技术的不足	69
4.2 高性能内燃机需要创新配气凸轮型线	70
4.3 变型双曲函数配气凸轮	71
4.4 用多学科综合评价变型双曲函数配气凸轮	73
参考文献	78

第5章 优化冷却系统	79
5.1 冷却风扇优化试验研究	79
5.2 气缸与气缸盖优化试验研究	92
5.3 导风装置的设计与优化	108
5.4 风冷柴油机热负荷的控制	115
参考文献	122
第6章 优化燃烧系统	124
6.1 深盆形直喷式燃烧室	125
6.2 紊流燃烧室	141
6.3 涡流燃烧室	144
参考文献	159
第7章 小型柴油机冷起动性能提高技术	161
7.1 冷起动过程	161
7.2 影响因素分析	162
7.3 提高冷起动性能的辅助措施	170
7.4 改善涡流燃烧室柴油机冷起动性能的方法	172
参考文献	175
第8章 低噪声风冷柴油机的设计	176
8.1 噪声的基本性质	176
8.2 风冷柴油机的噪声源	186
8.3 风冷柴油机的低噪声技术	188
8.4 低噪声柴油机设计实例	201
参考文献	202
第9章 小型风冷万能单缸试验柴油机	204
9.1 主要技术规格与应用范围	204
9.2 结构与技术特点	205
9.3 性能试验	208
参考文献	209

第 1 章 小型风冷柴油机的 发展与研究

1.1 小型风冷柴油机的特点

在柴油机中,燃料燃烧所放出热量的 20% ~ 30% 是通过气缸盖、气缸与冷却系统传递到大气中去的。最初,柴油机都是用水作为中间介质,将散发的热量首先传给冷却水,再由冷却水通过散热器传递到大气中去。自从 1927 年奥地利奥斯特罗·戴姆勒(Aus-tro - Daimler)公司制造了第一台高速风冷柴油机(图 1-1)以来,风冷柴油机的使用领域与功率范围逐年扩大,性能指标不断提高,特别是在小功率范围内更为突出。这是因为与水冷柴油机相比,风冷柴油机具有以下独特的优点。

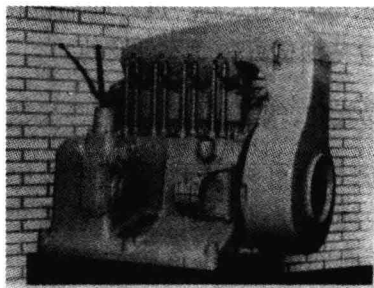


图 1-1 第一台高速风冷柴油机

1. 便于实现轻巧化

风冷柴油机冷却系统与柴油机制成一整体,减小了柴油机外

型尺寸与净质量,加上机体、气缸盖、气缸等零件结构净质量的减轻,以及较多地采用铝合金材料,其净质量比同排量、同功率的水冷柴油机轻 20% ~ 30%。风冷柴油机不仅便于实现轻巧化,而且易于将整机屏蔽起来,降低噪声。

2. 工作可靠

风冷柴油机不用水冷却,不需要水冷热交换器、水泵、冷却水管、接头与密封件,从而避免了因冰冻、沸腾、腐蚀与穴蚀引起的故障或损坏。据统计,水冷柴油机水冷系统的故障数占总故障数的 25% ~ 30%。

3. 对环境的适应性强

风冷柴油机散热片的温度较水冷柴油机冷却水的温度高 60℃ 左右,当环境温度变化时,散热片与周围空气之间的温差变化仍然不大,故散热量几乎与环境温度无关,它能在 -50℃ ~ 50℃ 的环境温度下保持良好的工作状态。而水的沸点是一定的,所以,水冷柴油机冷却水与环境空气之间的温差及散热量均随环境温度的升高而减小,于是必须用加大散热器尺寸的办法予以补偿,这又增加了柴油机的体积与成本。可见,风冷柴油机在恶劣气候条件下的适应能力是水冷柴油机可望而不可及的。

4. 暖机快、易起动、气缸磨损小

风冷柴油机因气缸外壁无水,其热惯性比水冷柴油机小得多,起动后能很快使柴油机主要零件的温度升高到正常运转状态,并且能在很短时间内达到全负荷工作,这一点对于低温地区或用于应急的动力装置尤为重要。图 1-2 示出了风冷柴油机与水冷柴油机起动后气缸壁温升随时间的变化关系。可见,风冷柴油机气缸壁温度上升的速度远比水冷柴油机快。这不仅大大减少了起动时特别是低温起动时,柴油机预热过程中因气缸壁温度过低所造成的气缸机械磨损,而且大大减少了废气在露

点温度($65^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$)以下时,燃烧产物中 H_2O 与 SO_2 、 SO_3 相遇形成 H_2SO_3 和 H_2SO_4 对气缸产生强烈的腐蚀性磨损。试验证明,风冷柴油机气缸的磨损量仅为水冷柴油机气缸的一半,同时碳氢排放物也少。

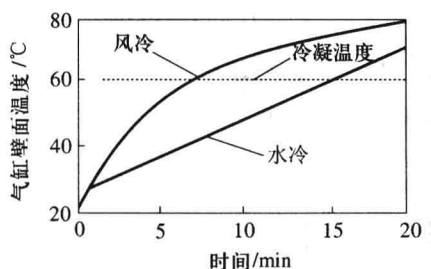


图 1-2 风冷柴油机与水冷柴油机起动后气缸壁温升随时间的变化关系
(距气缸内壁 1mm 处测量)

由于风冷柴油机的热惯性小,所以在较低的温度下,采用加热的方法能够有效地起动。

5. 热效率高

由于风冷柴油机气缸壁温度较高,因此,在压缩与膨胀行程中工质向气缸壁的传热量就较水冷柴油机少。所以,在同样结构、同样加热的条件下加入相同的热量,表示在示功图上风冷柴油机压缩过程曲线与膨胀过程曲线均较水冷柴油机高,故其指示热效率高。

润滑油的黏度随着温度的升高而降低,机械摩擦损失功率随之减少。在润滑油的允许工作范围内,气缸壁温度每升高 25°C ,相对摩擦损失功率约降低 8%。试验还表明,将水冷柴油机的冷却水温度提高,一般情况下,会使功率增加,燃油消耗率降低,即水冷柴油机气缸壁温度并不是最合理状态。

由于风冷柴油机散热片的温度较水冷柴油机散热器散热片的温度高,因而冷却空气的利用率高。风冷柴油机的风扇效率,一般为 $0.7 \sim 0.8$,而水冷柴油机的风扇效率大约只有 0.4。但是,风冷

柴油机所需要的冷却风压(约 $150\text{mmH}_2\text{O}$)比水冷柴油机高。所以,二者冷却风扇所消耗的功率大致相等。当计及水冷柴油机冷却水泵所消耗的功率时,风冷柴油机冷却系统所消耗的功率比水冷柴油机少,故其机械效率高。

以上说明,风冷柴油机的有效热效率比水冷柴油机高,尤其在部分负荷下差别更大。

6. 便于制造维修

风冷柴油机的气缸盖、气缸大部分采用单体结构,便于制造、拆装、维修、系列化与大批量生产。如道依兹(Deutz)公司生产的FL413系列风冷柴油机,所有机型中85%的零件都是通用的。

众所周知,柴油机冷却是靠气缸外壁以热交换的方式向冷却介质散热的。一般水冷柴油机气缸外壁向冷却水散热的传热系数比风冷柴油机气缸外壁向冷却空气散热的传热系数大40倍左右。这就使得风冷柴油机一些受热零件的温度较高,而且某些重要部位又因散热困难,造成了风冷柴油机较高的热负荷。特别是随着气缸直径增大,单位气缸工作容积的散热量减小,柴油机的热负荷更为严重。为了获得良好的冷却效果,总希望散热片与冷却空气之间有着较大的温差。事实上,二者的温度均要受到一定条件的限制。若采用加大散热片高度的办法来增加散热表面积,会使其肋效率降低,意义不大;而提高冷却空气流速又导致压力损失过大,也不恰当。所以风冷柴油机要实现大排量与高强化就比较困难,一般气缸直径超过120mm的柴油机大都采用水冷方式。

由于风冷柴油机气缸盖温度较高,增加了进气时对新鲜充量的加热,从而导致风冷柴油机的充量系数比水冷柴油机低5%左右,相应的平均有效压力与升功率也就较水冷柴油机低。

其次,水冷柴油机冷却水套起着隔声作用,而风冷柴油机散热片易于激发噪声,因此,通常风冷柴油机的噪声较水冷柴油机大。

然而,随着材料性能的进步,冷却空气导流和散热的最佳化,以及尽可能地降低关键零部件的机械负荷与热负荷,可使风冷柴油机完全能与强化的水冷柴油机相竞争。

1.2 小型风冷柴油机的发展方向

风冷柴油机从 20 世纪 50 年代末期开始研制以来,无论是在品种数量上,还是性能指标等方面都有了很大的进展。其单缸功率从 1.5kW 到 15kW 不等,气缸直径从 55mm 到 120mm,气缸数目从单缸到 6 缸均有,通过多年的研究、制造与使用方面的实践,使其结构、制造工艺、性能指标、使用可靠性和寿命等方面都日臻完善。

小型风冷柴油机主要作为农用动力,广大农民对柴油机提出了“一要好,二要小,三要花钱少”的要求。随着内燃机科学技术的发展,轻量化、高性能(高功率、低油耗、低振动、低噪声、低排污、易起动)、低成本和高寿命是小型风冷柴油机发展的必然趋势。

1. 轻量化

(1)从创新的理念出发,在总体结构与零部件设计时,进行多学科(如运用机构运动学、摩擦学、材料学、力学、传热学、制造工艺学、环境工程学、技术经济学等)综合分析,在设计上作到结构最简单、运动最合理、零件数目最少、材料选择恰到好处。如应用机构学、流体力学和材料学等学科对空气滤清器进行综合分析,获得的优化空气滤清器具有零件数目少、质量小、流阻小与噪声低的特点,零件数目从原来的 11 个减少到 4 个,同时将金属材料改成工程塑料,净质量降低 70%。

(2)采用短行程、短连杆、短活塞、短气缸结构。短行程、短连杆结构可减小曲轴回转半径,缩短机体高度;短活塞、短气缸(在下止点时活塞裙部露出气缸 16mm 左右)结构,可缩短整机高度;

二者均可减轻柴油机的净质量。近几年来,小型风冷柴油机的转速普遍大幅度提高,国外产品大多为 3600r/min。在气缸直径 65mm~90mm 范围内的产品中,绝大部分采用行程缸径比 $S/D < 1$ 的结构,一般为 0.75~1.0。因此,提高转速后,活塞平均速度仍然不高。这样,不仅升功率显著提高,而且结构更加轻巧精致,完全可与汽油机相媲美。如洋马 L60 型单缸风冷柴油机,缸径 75mm,行程 62mm,4.4kW/(3600r/min),整机质量 30kg。又如阿克美 AND60W 单缸风冷柴油机,缸径 95mm,行程 85mm,8.9kW/(3600r/min),比质量仅 6.2kg/kW。

(3)应用现代设计理论与设计方法,优化零部件结构设计,以获得质量最轻、成本最低与承载能力最大的最佳设计方案。

(4)努力提高制造水平,控制机体等铸造件的壁厚尺寸。甩油圈、齿轮室盖、导风罩、冷却风扇与空气滤清器等零部件采用工程塑料,使柴油机形体更加轻巧精致。

采用上述技术措施,开发的轻型高性能 SC165F、BH170F 型柴油机的净质量,分别从原产品 165F、170F 型柴油机的 43kg、41kg 减轻到 30kg 与 28kg。

2. 高性能

柴油机的高性能主要是指其具有高功率、低油耗、低振动、低噪声、低排污、易起动特性。

1) 高功率

高功率主要是提高升功率,而升功率正比于机械效率、充量系数、指示热效率、进气管状态下的空气密度、空气利用率和柴油机转速等参数,因此,凡能提高这些参数值的技术措施,都有利于实现柴油机高功率。

2) 低油耗

低油耗,只有通过提高循环指示热效率与机械效率来实现。要提高指示热效率,就需要从研究柴油机实际循环和理论循环入手,深入分析在整个热功转换过程中各种热力损失的大小及

其分布情况,切实掌握各种因数对热力损失的影响程度,从而寻找减少这些损失的具体技术措施。主要是优化燃烧过程,实现气缸内空气运动特性、喷油规律、喷注特性、燃烧室空间形状尺寸与传热规律的合理匹配,以提高燃烧效率。

当然采用经济性好的直接喷射式燃烧室取代分隔式燃烧室,有利于改善柴油机的经济性。如久保田 E750 型柴油机,缸径 78mm,行程 84mm,将其涡流式燃烧室改为直接喷射式燃烧室后,燃油消耗率明显降低。然而要实现柴油机直喷化,关键在于有高质量的喷油泵与喷油器,尤其是喷油器。否则,实验室里测得燃油消耗率低,实际运转一段时间后,由于喷注特性变坏,燃烧条件变差,燃油消耗率比分隔式燃烧室柴油机还要高,这一点应值得注意。

提高机械效率主要是从优化结构参数,合理设计活塞、活塞环结构,减少活塞环数目,选择最佳配合间隙与摩擦副的配对材料,保持柴油机处于最佳的热状态下工作,实现流体膜润滑,提高零件的制造精度与改善表面质量,减少驱动附件的功率消耗,以及保持柴油机具有良好的技术状况等方面来实现。

另外,还要实现柴油机与其配套装置的优化匹配,使柴油机处于经济区域运行。

3) 低振动

柴油机产生振动,不仅有益于动力装置运转的平稳性,恶化操作人员的劳动条件,影响作业质量,而且振动将引起噪声,消耗能量,降低机器的总效率和机组的耐久性。

当然采用双轴平衡结构来平衡柴油机的一阶与二阶往复运动惯性力,是减轻振动的有效措施。但对于小型单缸风冷柴油机来说,不仅使其结构复杂,体积增大,质量增加,维修不便,而且增加制造成本,实际应用价值不大。目前多数采取适当加大曲轴平衡块质量的办法,将往复惯性力转换为不平衡力矩或部分转移到水平方向。这种方法虽然有利于减小振动,但效果不佳。然而,更重要的措施是减小连杆活塞组往复运动件的质量,

以减小往复惯性力引起的振动,如日本古浜庄一等人采用一道气环和一道单片薄油环的双环活塞结构,活塞组质量比三环活塞减小 25%。又如采用纤维化铝合金连杆,在保证同样的强度与刚度条件下,连杆质量比钢制连杆减小 35% 左右,这样就能有效减小振动。其次,提高曲轴刚度,减小轴承间隙,应用隔振措施等办法均可减小振动。

4) 低噪声

运转噪声大一直是风冷柴油机的敏感问题,这在一定程度上也影响了它的推广应用。为了降低柴油机的噪声,内燃机工作者都在争相研制新型燃烧系统,采用各种消声和屏蔽技术,应用各类阻尼材料,塑料导风装置与油箱,提高加工精度等措施,使柴油机噪声有了明显的降低(见第 8 章)。同时也开发了一些低噪声的新产品,如赫茨公司 L 系列全封闭隔声的箱式柴油机,其整机噪声只有 72dB(A),阿克美公司在导风罩内装置特殊吸声材料,已使柴油机噪声降到 77dB(A)。

5) 低排污

低排污是人类环境保护对动力机械提出的基本要求。柴油机燃烧用的是燃料与空气中的氧气,因而对环境的适应性非常敏感。如它在陆地上能正常工作,而在海底下则喘不过气来,若在温带地区能正常工作,而在赤道则可能无法运转。气候条件和运转状况会直接影响到柴油机的性能和使用寿命。反过来内燃机又严重地影响到人类环境质量,它激发出的噪声、排出的废气(CO、HC、NO_x,颗粒,黑烟)连同振动共同构成了人类环境的主要污染源之一,直接威胁着人类的安全。人类不能用自己的智慧和劳动创造的文明与技术来毁灭自己。因而,我们必须从研究柴油机与环境质量之间的相互关系出发,找到两全其美的途径与方法,使人们在优良的环境条件下,得到发动机所提供的优质服务。因此,各个国家对内燃机的废气净化都给以足够的重视,相继制定了严格的排气法规与排烟法规,而且这些法规的规定越来越严,要求越来越高,限制的领域越来越广,限制的项目也越来越多。为了保护人类

环境,内燃机工作者继续在深入广泛地进行试验研究工作,相继发现了排气污染的影响因素,陆续找到了废气净化对策,并取得了良好的效果,有关文献已作了详尽介绍,这里不再赘述。

6) 易起动

柴油机起动困难要比其油耗、排放与噪声特性差更麻烦。我国冬季大部分地区平均气温在 0°C 以下,但不少制造厂生产的小型柴油机,虽经多年努力仍达不到国家规定在环境温度 0°C 能顺利起动的要求。究其原因:一是柴油机气缸直径越小,单位气缸工作容积的散热损失与漏气损失越大,使得压缩终点的温度下降;二是单位气缸工作容积摩擦损失随着气缸直径的减小而增大,导致需要较大的起动力矩,使得手摇起动更为困难;三是我国小型柴油机大多采用起动性能先天性不足的涡流式燃烧室。因此,提高小型柴油机冷起动性能是一项重要的研究课题。

柴油机的起动过程,是由初始着火、转速渐增的瞬态过程与脱开起动器后的平稳燃烧过程所组成。可见,初始着火是柴油机冷起动的首要条件,而着火后能持续燃烧又是柴油机冷起动的必要条件。否则,柴油机只是放几声空炮,仍不能正常运转。这就是说,在保证柴油机其他性能指标先进的前提下,要获得良好的冷起动性能,关键在于合理组织燃烧过程。即必须保证给起动时所需合适混合比的空间成分创造最适宜的温度条件,以及增加着火温度的持续时间。同时,设法减少能量损失,提高机械效率,使用匹配良好的燃油喷射系统,选择合理的增速比等措施均有利于改善柴油机的冷起动性能。试验表明,在155F柴油机上实施了这些措施后,当环境温度在 -1°C 时均能顺利起动。

3. 低成本

低成本首先应从产品设计上着手,真正做到结构简单、合理,材料选择恰当,工艺性好,便于维护保养。同时特别注意提高产品系列化、零件通用化与零件设计标准化程度,这不仅是提高产品质量、降低生产成本、合理组织企业生产、提高劳动生产率的主要措

施,而且是发展新产品、便于使用维修、组织配件供应和零部件互换的重要保障。

对于小型风冷柴油机,发展同一行程、不同气缸直径、不同转速的变型产品,不仅可以满足不同用户的需要,而且可有效地降低生产成本,提高通用化、标准化程度。如湖南省在 165F 型柴油机上扩缸成 170F、175F 型柴油机,行程均为 70mm,其通用化程度达 83.2%,标准化系数为 94.8%。浙江省在 175F 型柴油机基础上扩缸、强化设计,开发系列产品 Z180F、Z185F 型柴油机,行程均为 85mm,三种机型的非标准零件通用率达 87%。由于工艺继承性好,易于保证产品质量的稳定性,降低了生产成本。

另外,从制造方面降低成本,关键在于合理组织生产流程,采用经济加工方法,减少制造工艺系统中的能源消耗与最大限度地提高材料利用率。

4. 高寿命

柴油机的高寿命是建立在设计计算、测试技术、工艺材料、质量管理等技术综合发展的基础上的。采用新结构、新材料、新工艺,以及科学地生产与使用,是提高柴油机寿命的关键。近 10 年来,我国风冷柴油机的寿命得到了一定的提高,但与国外先进机型相比,仍然存在着一定的差距,需要从以下几个方面进一步努力。

(1) 改善混合气形成与燃烧过程,以控制好柴油机工作的平稳性及机械负荷。

(2) 对各受热零部件采取适当的散热与有效的冷却措施,以控制好柴油机的热负荷。

(3) 合理选择结构参数,适当增大机体刚度,设计平稳性、充气性和润滑特性好的配气机构,以提高整机的平稳性。

(4) 对机体、气缸盖、气缸、活塞、连杆、曲轴等关键零部件进行优化设计,即根据产品设计要求与给定条件,合理确定各项设计参数,获得净质量最小、成本最低、性能优良、承载能力最大的最佳设计方案。