

杨建华 编著

小型风冷柴油机设计

机械工业出版社

小型风冷柴油机设计

杨建华 编著



机械工业出版社

小型风冷柴油机设计

杨建华 编著

*

责任编辑：钱既佳 版式设计：霍永明
封面设计：张洪哲 责任校对：宁秀娥

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

湖南省新华印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张7¹/₄·字数 188 千字
1991年4月湖南第一版·1991年4月湖南第一次印刷
印数 0,001-2,500 ·定价：6.30元

*

ISBN 7-111-02583-0/TK·101(X)

内 容 简 介

本书为论述小型风冷柴油机设计的专著。书中较系统地阐述了空气冷却与热负荷方面的基础理论及其应用，风冷柴油机结构分析与设计要点，并介绍了这一领域中的最新研究成果，以供专业人员开发新产品和解决有关生产问题时参考。

主要内容包括：风冷柴油机的发展与研究，结构参数分析与设计要点，空气冷却的理论基础，冷却系统设计、气缸盖与气缸设计，柴油机的机械损失，国内外小型风冷柴油机的结构分析。

本书可作为内燃机专业高年级学生和研究生的教学参考书，也可供从事内燃机科研、设计与制造的工程技术人员参考。

前 言

风冷柴油机与水冷柴油机相比，具有结构简单、工作可靠、热效率高、制造成本低、使用维修方便和能适应各种气候条件下工作的优点。近十年来，随着我国对风冷柴油机的深入试验研究，使其性能指标得到了全面提高，使用领域逐渐扩大，产量迅速发展，出口数量也日益增加。

我国幅员辽阔，环境条件差异很大，开发具有轻量化、低油耗、低振动、低噪声、低排污、低成本、易起动、高寿命的新一代小型风冷柴油机，对发展国民经济有着重要的意义。为此，作者将多年在从事小型风冷柴油机科研、教学和产品设计中积累的一些经验与资料整理成册，供同行参考。

本书由湖南大学杨连生教授主审，并担任第一及第三至第六章的审稿工作，第二章由武汉水运工程学院林发森教授审稿。在初稿完成后，由湖南大学邵阳分校欧阳光耀、张邦阳两位副教授对部分章节进行了初审。

在编写过程中，北京理工大学魏春源副教授、复旦大学尚汉冀教授、洛阳拖拉机研究所孙德生高级工程师、无锡柴油机厂唐寿鹏高级工程师提供了宝贵的资料，同时得到了彭腾辉、刘菊春、李昌义、罗会兰、蒋立众、唐维新、张春宇、谷益华、刘玉清、杨又新、雷瞬阶同志的大力支持，匡军彪与谭高荣同志抄写了部分原稿。在此一并表示谢意。

由于作者水平有限，时间仓促，加上工作范围的限制，所收集的资料不够全面，书中错误或不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

1990年2月

主要符号

- A ——蜗壳张度, mm
 a ——音速, m/s
 b_1 ——叶片进口宽度, mm
 b_2 ——叶片出口宽度, mm
 C_m ——活塞平均速度, m/s
 c ——绝对速度, m/s
 C_0 ——绝对黑体辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
 c_r ——径向分速, m/s
 c_u ——切向分速, m/s
 c_s ——空气的轴向流速, m/s
 D ——气缸直径, mm
 D_1 ——风扇内径, mm
 D_2 ——风扇外径, mm
 D_k ——散热片平均直径, m
 D_N ——风扇轮毂直径, mm
 d_e ——当量直径, m
 F_1 ——气缸周壁面积, m^2
 F_2 ——气缸外壁散热面积, m^2
 F_p ——活塞顶面积, m^2
 G ——流量, 风量, kg/s
 G_{fb} ——标定工况时小时燃油消耗量, kg/h
 G_{f_0} ——空载时小时燃油消耗量, kg/h
 G_r ——葛拉晓夫准则数
 g_e ——燃油消耗率, $g/(kW \cdot h)$

- H_u ——燃油低热值, kJ/kg
 h ——散热片高度, mm
 i ——气缸数目, 个
 L ——连杆长度, mm
 N ——风扇的轴功率, kW
 N_u ——风扇的有效功率, kW
 N_e ——努谢尔特准则数
 \bar{N} ——功率系数
 n ——转速, r/min
 n_s ——比转速
 P ——柴油机的有效功率, kW
 P_i ——柴油机的指示功率, kW
 P_m ——柴油机的机械损失功率, kW
 P_r ——普朗特准则数
 p ——风压, Pa
 p_d ——动压, Pa
 p_e ——平均有效压力, MPa
 p_i ——平均指示压力, MPa
 p_{st} ——静压, Pa
 p_z ——最高爆发压力, MPa
 \bar{p} ——压力系数
 Q ——空气流量, m³/s; 散热量, W
 Q_a ——气缸盖散热量, W
 Q_c ——对流换热量, W; 气缸散热量, W
 Q_f ——火焰辐射换热量, W
 Q_r ——辐射换热量, W
 Q_g ——气体辐射换热量, W
 Q_w ——冷却介质所带走的热量, W
 \bar{Q} ——流量系数
 q_w ——热流密度, 热负荷, W/m²

- R_e ——雷诺准则数
 S ——活塞行程, mm
 s ——散热片间距, mm
 T ——温度, K
 T_r ——颜色温度, K
 T_f ——火焰温度, K
 T_o ——气缸内工质瞬时温度, K
 T_{gm} ——一个循环内气缸内工质的平均温度, K
 T_1 ——绝热理论燃烧温度, K
 T_o ——冷却空气的平均温度, K
 T_{w1} ——气缸内壁面温度, K
 T_{w2} ——气缸外壁面温度, K
 t ——散热片节距, mm; 时间, s
 u ——圆周速度
 V_h ——气缸工作容积, m^3 或 l
 W_e ——有效功, J
 W_i ——指示功, J
 W_m ——机械损失功, J
 w ——相对速度, 流速
 α ——过量空气系数, 叶片工作角, ($^\circ$)
 α_g ——高温工质与气缸周壁的平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 α_{gm} ——高温工质与气缸周壁的瞬时传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 α_o ——散热片与冷却空气的平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 α_z ——相对于散热片基面的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 β ——肋化系数
 β_1 ——叶片进口安装角, ($^\circ$)
 β_2 ——叶片出口安装角, ($^\circ$)
 ε ——压缩比
 ε_f ——火焰黑度
 ε_g ——气体黑度

- ε'_w ——气缸周壁的有效黑度
- η ——效率；润滑油动力粘度，Pa·s
- η_0 ——肋效率
- η_e ——有效热效率
- η_i ——指示热效率
- η_m ——机械效率
- η_v ——充量系数、容积效率
- θ ——过剩温度，℃
- λ ——固体导热系数，W/(m·K)，连杆比
- λ_f ——流体导热系数，W/(m·K)
- λ_r ——摩擦阻力系数
- μ ——空气的动力粘度，Pa·s
- μ_m ——平均流量系数
- ν ——空气的运动粘度，m²/s
- ρ ——空气密度，kg/m³
- δ ——壁厚，m
- δ_m ——散热片平均厚度，mm
- δ_0 ——散热片根部厚度，mm
- ω ——角速度，rad/s
- τ ——冲程数

目 录

第一章 小型风冷柴油机设计概论	(1)
一、风冷柴油机的特点	(1)
二、发展方向	(5)
三、参数分析	(13)
参考文献	(24)
第二章 空气冷却的理论基础	(26)
一、气缸的传热过程分析	(26)
二、用综合法确定传热系数	(38)
三、气缸内高温工质的瞬时传热系数 α_i	(44)
四、散热片与冷却空气的传热系数 α_0	(48)
五、散热片的传热分析与结构设计	(54)
参考文献	(65)
第三章 冷却系统设计	(68)
一、冷却系统的总体布置	(68)
二、冷却风必须带走的热量及所需风量、风压的确定	(71)
三、冷却风扇设计与研究	(73)
四、导风罩	(101)
五、风扇与柴油机的匹配	(106)
参考文献	(108)
第四章 气缸盖与气缸设计	(109)
一、气缸盖	(109)
二、气缸	(134)
三、气缸的连接与安装	(144)
参考文献	(148)
第五章 小型风冷柴油机的机械损失	(150)
一、引言	(150)
二、机械损失及其计算	(151)
三、机械损失的测定	(156)

四、减少机械损失的措施·····	(162)
参考文献·····	(171)
第六章 国内外小型风冷柴油机结构分析·····	(172)
一、湖南175F-1型柴油机·····	(172)
二、浙江175F-2型柴油机·····	(176)
三、日本L系列风冷柴油机·····	(178)
四、日本GD320、GD410型柴油机·····	(183)
五、联邦德国D302系列柴油机·····	(187)
六、联邦德国E671型柴油机·····	(190)
七、联邦德国FL208D型柴油机·····	(192)
八、意大利RF系列风冷柴油机·····	(195)
九、意大利9LD561-2型柴油机·····	(198)
参考文献·····	(201)
附录I 国内外部分中小功率风冷柴油机技术规格·····	(203)
附录II 传热计算用特殊函数表·····	(211)
附录III 物性数据·····	(219)

第一章 小型风冷柴油机设计概论

一、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、气缸和冷却系统传递到大气中去的。开始,柴油机都用水作为中间介质,将散发的热量先传给冷却水,再由冷却水通过散热器传递到大气中去。自从1927年奥地利的奥斯特罗-戴姆勒(Austro-Daimler)公司即现在的styr公司,制造了采用空气直接冷却的第一台高速风冷柴油机以来,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。

1. 尺寸小、重量轻、工作可靠

冷却系统与柴油机制成一整体,这种结构不仅可使柴油机外形尺寸和重量最佳化,而且易于将整机屏蔽起来,降低噪声。

风冷柴油机不需要水冷热交换器、水泵、冷却水管、接头与密封件,加上机体、气缸盖、气缸等零件结构重量的减轻,以及较多地采用铝合金材料,使其实际使用重量一般比同排量、同功率的水冷柴油机轻20~30%^[1]。

据统计,水冷柴油机水冷系统的故障数占总故障数的25~30%^[2],风冷柴油机不用冷却水,因而避免了因冰冻、沸腾、腐蚀与穴蚀引起的故障或损坏。

2. 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即的。

3. 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1-1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

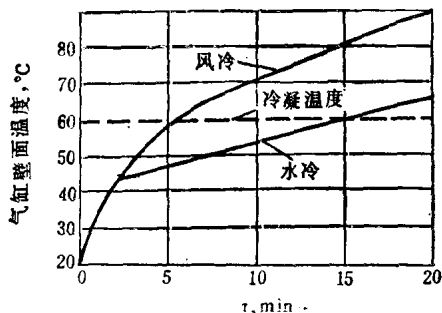


图 1-1 空载起动后气缸壁温度上升曲线
(在距气缸内壁1mm处测量)

的气缸机械磨损，而且大大减少了废气在露点温度(65~75℃)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仅为水冷柴油机气缸的一半，同时碳氢排放物也少。

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。

4. 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。

润滑油的粘度随着温度的升高而降低,机械摩擦损失功率随之减少。如图 1-2 所示,在润滑油的允许工作

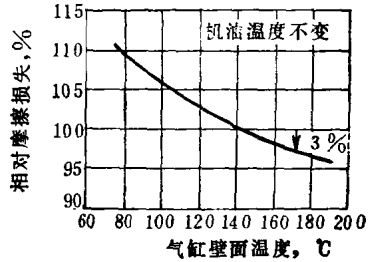


图1-2 摩擦损失随气缸壁面温度的变化曲线

范围内,气缸壁温度每升高25℃,相对摩擦损失功率约降低3%^[3]。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,一般在0.7~0.8之间,而水冷柴油机的风扇效率大约只有0.4左右。当然,风冷柴油机所需风压(约150mmH₂O)[⊖]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

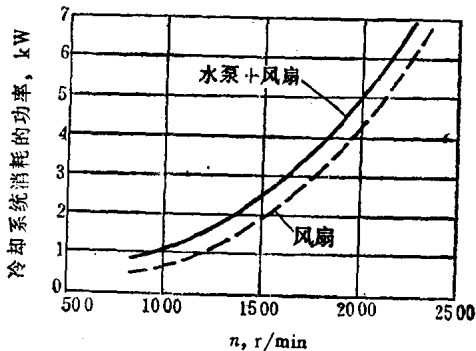


图 1-3 柴油机冷却系统消耗功率的比较

⊖ 1mmH₂O = 9.80665Pa

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，如图1-3所示，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，特别在部分负荷下差别更大。

5. 便于制造、维修方便

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，而且某些重要部位因散热困难，从而造成了风冷柴油机较高的热负荷。特别是随着气缸直径的增大，相对散热量的减小，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，会使其热效率降低，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度就比较困难，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，从而造成了风冷柴油机的充量系数比水冷柴油机低5%左右，相应地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音作用，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，冷却空气流量和散热的最佳化，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。

二、发展方向

自1927年研制出第一台高速风冷柴油机（见图1-4）以来，

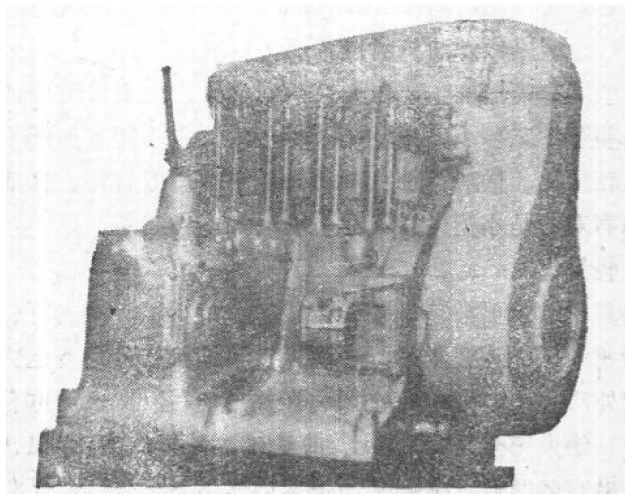


图1-4 第一台高速风冷柴油机

除1931年 Marks 报导了一些试验情况外，风冷柴油机的研究几乎还是空白^[4]。在第二次世界大战期间，欧洲和美国由于军事上的需要，促进了风冷柴油机的发展。如道依兹公司1937年研制了8缸飞机用风冷发动机，1944年又投产了FL514系列车用风冷柴油机。但是，国外风冷柴油机主要还是从40年代以后才逐渐发展起来的，其制造厂家、产品型号和产量都迅速增加。主要厂家有联邦德国的道依兹、赫茨(Hatz)、费里曼(Farymann)；意大利的沙姆(Same)、隆巴迪尼(Lombardini)、罗杰利尼(Ruggerini)、阿克美(Acme)、斯兰兹(Slanzi)、杜卡蒂(Ducati)；英国的底特李斯特(Peter-Lister)；法国的贝那尔(Bernard)等。其中几家主要生产小型风冷柴油机的公司年总产量已达40~50万台。国外部分小型风冷柴油机的技术规格见附录I-1。

我国从50年代末期开始研制风冷柴油机，30多年来，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。根据不完全统计，现在已有近50家工厂制造风冷柴油机，其单缸功率从1.5

kW 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。国内部分小型风冷柴油机的技术规格见附录I-2。

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。随着内燃机技术的发展, 轻量化、低油耗、低振动、低噪声、低排污、低成本、易起动和高寿命是小型风冷柴油机发展的必然趋势。

1. 轻量化

轻量化的主要措施是采用高转速、短行程、短连杆、三环或两环活塞结构。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65~90mm范围内的产品中, 绝大部分采用 $S/D < 1$ 的结构, 一般在0.75~1.0之间。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。与30年代初期的水平相比, 升功率提高了24~28%, 比重量下降了约30%^[5]。如洋马L60型单缸风冷柴油机, 缸径75mm, 行程62mm, 4.4KW/(3600r/min), 整机重量30kg^[6]。又如阿克美AND60W单缸风冷柴油机, 缸径95mm, 行程85mm, 8.9kW/(3600r/min), 比重量仅6.2kg/kW。

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, 这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。而其中最主要的一个方面就是改进燃烧过程, 实现燃烧室空间形状和几何尺寸、气缸内空气涡流运动特性与燃油喷射和雾化特性的合理匹配, 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78