

高等学校交流讲义

自由活塞式发动机

史紹熙編著

前 言

自由活塞式发动机是一种新型热力装置，是近三十年来逐渐发展起来的。由于这种发动机具有结构简单、体积较小、重量较轻和热效率较高等优点，目前已被认为是一种很有前途的动力机械。许多国家都在进行研究和制造，并且已经有了正式产品。我国在这方面也已进行了许多研究和试制工作。

由于这一工作在国内的迅速发展，为了适应这一需要，天津大学内燃机专业增設了“自由活塞式发动机”课程，本书就是为这一课程而编写的教材。

书中第一章论述了自由活塞式发动机的基本概念、优缺点和这种发动机在世界各国的发展概况；在第二章中，介绍了各种自由活塞式压气机和自由活塞发气机的构造；第三章讨论了它们的特殊组件；在第四章中，研究了自由活塞式发动机的热力循环、热力计算和动力计算。

在讲授本课程以前，学生应学习过内燃机原理、内燃机构造及计算、压气机和燃气涡轮等专业课程。

本书内容分量适合三十六学时左右的讲授，符合1959年的全国内燃机专业指导性教学计划对于该课程所规定的时数。在使用这一教材时，可以根据各校具体情况，对内容作适当补充或删减。

本书是系统论述自由活塞式发动机理论和构造并作为教材的初次写作，难免有缺点，作者将热诚欢迎对本书的

批評和意見。

在編写过程中，李厚生同志曾給予很大帮助，使本书得以如期出版。

編 者

目 次

前言	3
采用的主要符号	6
第一章 緒論	11
1. 自由活塞式发动机的基本概念	11
2. 自由活塞式发动机的优缺点	14
3. 自由活塞式发动机的发展概况	19
第二章 自由活塞式发动机的分类及其构造	24
1. 自由活塞式发动机的分类	24
2. 有气垫的自由活塞式发动机-压气机	25
3. 无气垫的自由活塞式发动机-压气机	32
4. 有气垫的自由活塞发气机	46
5. 无气垫的自由活塞发气机	53
第三章 自由活塞式发动机的特殊组件	61
1. 同步机构	61
2. 起动机构	64
3. 燃料供应系统	68
4. 稳定器	75
第四章 自由活塞式发动机的热力分析及动力计算	83
1. 自由活塞式发动机的热力循环	83
2. 自由活塞式发动机的热计算及其基本尺寸的确定	93
(一) 自由活塞发气机的热计算及其基本尺寸的确定	93
(二) 自由活塞式压气机基本尺寸的确定	106
(三) 自由活塞式发动机气垫气缸的计算	112
3. 自由活塞式发动机的动力计算	116
(一) 自由活塞式发动机的动力方程式	116
(二) 自由活塞式发动机动力计算的有限差积分法	121
(三) 自由活塞式发动机频率的近似计算	131
参考文献	136

高等学校交流讲义

自由活塞式发动机

史紹熙編著

前 言

自由活塞式发动机是一种新型热力装置，是近三十年来逐渐发展起来的。由于这种发动机具有结构简单、体积较小、重量较轻和热效率较高等优点，目前已被认为是一种很有前途的动力机械。许多国家都在进行研究和制造，并且已经有了正式产品。我国在这方面也已进行了许多研究和试制工作。

由于这一工作在国内的迅速发展，为了适应这一需要，天津大学内燃机专业增設了“自由活塞式发动机”课程，本书就是为这一课程而编写的教材。

书中第一章论述了自由活塞式发动机的基本概念、优缺点和这种发动机在世界各国的发展概况；在第二章中，介绍了各种自由活塞式压气机和自由活塞发气机的构造；第三章讨论了它们的特殊组件；在第四章中，研究了自由活塞式发动机的热力循环、热力计算和动力计算。

在讲授本课程以前，学生应学习过内燃机原理、内燃机构造及计算、压气机和燃气涡轮等专业课程。

本书内容分量适合三十六学时左右的讲授，符合1959年的全国内燃机专业指导性教学计划对于该课程所规定的时数。在使用这一教材时，可以根据各校具体情况，对内容作适当补充或删减。

本书是系统论述自由活塞式发动机理论和构造并作为教材的初次写作，难免有缺点，作者将热诚欢迎对本书的

批評和意見。

在編写过程中，李厚生同志曾給予很大帮助，使本书得以如期出版。

編 者

目 次

前言	3
采用的主要符号	6
第一章 緒論	11
1. 自由活塞式发动机的基本概念	11
2. 自由活塞式发动机的优缺点	14
3. 自由活塞式发动机的发展概况	19
第二章 自由活塞式发动机的分类及其构造	24
1. 自由活塞式发动机的分类	24
2. 有气垫的自由活塞式发动机-压气机	25
3. 无气垫的自由活塞式发动机-压气机	32
4. 有气垫的自由活塞发气机	46
5. 无气垫的自由活塞发气机	53
第三章 自由活塞式发动机的特殊组件	61
1. 同步机构	61
2. 起动机构	64
3. 燃料供应系统	68
4. 稳定器	75
第四章 自由活塞式发动机的热力分析及动力计算	83
1. 自由活塞式发动机的热力循环	83
2. 自由活塞式发动机的热计算及其基本尺寸的确定	93
(一) 自由活塞发气机的热计算及其基本尺寸的确定	93
(二) 自由活塞式压气机基本尺寸的确定	106
(三) 自由活塞式发动机气垫气缸的计算	112
3. 自由活塞式发动机的动力计算	116
(一) 自由活塞式发动机的动力方程式	116
(二) 自由活塞式发动机动力计算的有限差积分法	121
(三) 自由活塞式发动机频率的近似计算	131
参考文献	136

采用的主要符号

N_i (馬力) —— 柴油机指示功率。

N_p (馬力) —— 发动机的气馬力。

N_{pk} (馬力) —— 压气机所需指示馬力。

l_{ka} (公斤米/公斤) —— 压气机絕热压缩 1 公斤空气所需的功。

l_{ma} (公斤米/公斤) —— 燃气渦輪絕热膨胀 1 公斤气体所产生的功。

l_k (公斤米/公斤) —— 压气机按多变过程压缩 1 公斤气体所需的功。

l_m (公斤米/公斤) —— 燃气渦輪按多变过程膨胀 1 公斤气体所产生的功。

l_d (公斤米/公斤) —— 柴油机气缸 1 公斤气体所产生的有效功。

l_i (公斤米) —— 柴油机气缸的指示功。

l_c (公斤米) —— 柴油机气缸中空气的压缩功。

l_{kc} (公斤米) —— 每一循环压气机气缸所消耗的功。

L_{ck} (公斤米) —— 压气机气缸所消耗的压缩功和输气功。

L_n (公斤米) —— 每一循环扫气泵所消耗的功。

L_{on} (公斤米) —— 回复冲程中扫气泵所消耗的功。

l_b (公斤米) —— 回复冲程时气热气缸中空气的膨胀功。

L_{mp} (公斤米) —— 每一循环的摩擦功。

L_{omp} (公斤米) —— 回复冲程的摩擦功。

η_k —— 压气机的效率。

η_c —— 柴油机的循环热效率。

η_i —— 柴油机的指示效率。

η_a —— 发气机的气效率。

η_r —— 燃气渦輪的内效率。

η_e —— 柴油机的实际效率。

η_m —— 机械效率。

η_{ycm} —— 自由活塞发气机——燃气渦輪裝置的循环热效率。

η_{kv} —— 压气机的容积系数。

η_{kd} ——压气机的输气系数。

η_v ——柴油机的充量系数（以有效冲程计）。

η'_v ——柴油机的充量系数（以全冲程计）。

η_w ——柴油机的传热损失系数。

V_K (米³/分) ——压气机的输气量（按压气机进口处气体状态计算）。

G_K (公斤/秒) ——每秒钟流过压气机的空气重量。

G_f (公斤/秒) ——每秒钟由柴油机流出的气体重量。

G_a (公斤/秒) ——每秒钟柴油机进排气孔关闭后留在气缸内的空气重量。

G_2 (公斤/秒) ——每秒钟流过燃气涡轮的气体重量。

V_h (米³) ——柴油机的工作容积（活塞扫过的容积）。

V (米³) ——柴油机气缸的瞬时容积。

V_{hK} (米³) ——压气机的工作容积。

V_{hb} (米³) ——气垫气缸的工作容积。

V_b (米³) ——气垫气缸的余隙容积。

V_a (米³) ——压缩开始时，柴油机气缸的总容积。

T_0° (绝对) ——环境（在压气机进口处）空气的温度。

T_K° (绝对) ——压气机出口处的空气温度。

T_a° (绝对) ——柴油机进气终点气体的温度。

T_c (绝对) ——柴油机压缩终点气体的温度。

T_z (绝对) ——柴油机气缸最高燃烧温度。

T_z (绝对) ——发气机排气温度。

ΔT° (C) ——温度升高值。

p_0 (大气压) ——环境空气压力。

p_a (公斤/厘米²) ——柴油机开始压缩时的气体压力。

p_c (公斤/厘米²) ——柴油机压缩终了时的气体压力。

p_z (公斤/厘米²) ——柴油机最高燃烧压力。

p_b (公斤/厘米²) ——柴油机膨胀终了时的气体压力。

p_K (公斤/厘米²) ——压气机出口处的空气压力。

p_e (公斤/厘米²) ——发气机排出后的气体压力。

p_n (公斤/厘米²) ——扫气箱中的空气压力。

p_b (公斤/厘米²) ——气垫气缸中的空气压力。

Δp_i (公斤/厘米²) ——压气机进气压力损失值。

Δp_d (公斤/厘米²) ——压气机输气压力损失值。

p_i (公斤/厘米²) ——以活塞全冲程計的平均指示压力。

p'_i (公斤/厘米²) ——以活塞有效冲程計的平均指示压力。

p_e (公斤/厘米²) ——以全冲程計的平均有效压力。

$p(t)$ ——柴油机气缸中作用在活塞上为时间函数的气体单位压力。

$R(s)$ ——相当于作用在柴油机活塞面积上为冲程函数的空气单位压力。

$R(V)$ ——为柴油机活塞所扫过容积函数的空气单位压力。

C_p (千卡/公斤分子度) ——空气的等压比热。

C_v (千卡/公斤分子度) ——空气的等容比热。

C_{p2} (千卡/公斤分子度) ——发气机排出燃气的等压比热。

C_{v2} (千卡/公斤分子度) ——发气机排出燃气的等容比热。

C'_v (千卡/公斤分子度) ——空气和残余废气混合气的等容比热。

K ——空气绝热指数。

K_2 ——燃气绝热指数。

m_1 ——压气机中空气的平均多变压缩指数。

m_2 ——压气机中空气的平均多变膨胀指数。

n_1 ——柴油机中平均多变压缩指数。

n_2 ——柴油机中平均多变膨胀指数。

n_b ——气垫气缸中平均多变压缩和膨胀指数。

A ——热功当量。

R ——气体常数。

C_h ——压气机进气预热系数。

C_y ——压气机漏气系数。

C_d ——压气机输气阻力系数。

C_l ——压气机进气阻力系数。

Π_k ——压气机的压力升高比 (理論)。

Π'_k ——压气机的压力升高比 (实际)。

Π_t ——燃气渦輪压力比。

θ ——燃气渦輪溫度升高比。

φ ——扫气系数。

α ——柴油机的过量空气系数。

ϵ ——柴油机的有效压缩比。

λ ——柴油机的压力升高比。

ρ ——柴油机的先期膨胀比。

δ ——柴油机的后期膨胀比。

γ ——残余废气系数。

ψ ——冲程损失系数。

α_k ——压气机余隙容积比。

α_b ——气垫气缸的余隙容积比。

τ ——柴油机进口至燃气渦輪进口間流动损失系数。

L_0 (公斤分子/公斤)——燃燒 1 公斤燃料所需的理論空气量。

H_u (千卡/公斤)——燃料的低热值。

$q = \frac{H_u}{\alpha L_0}$ ——柴油机进排气口关闭后, 留在气缸的每 1 公斤空

气的加热量。

M (公斤分子/公斤)——燃燒 1 公斤燃料所产生的燃燒产物。

m_0 ——理論分子变更系数。

m ——实际分子变更系数。

ϵ_z ——柴油机燃燒終点 z 以前的热量利用系数。

ϵ_b ——柴油机膨胀終点 b 以前的热量利用系数。

ϵ ——柴油机实际工作过程中的热量利用系数。

φ_n ——柴油机示功图丰满系数。

ϵ_{mp} ——自柴油机至燃气渦輪間輸气管道中燃气的能量损失系数。

g_{zz} (公斤/馬力时)——以燃气功率为标准的燃料消耗率。

$g_{eyc.m}$ (公斤/馬力时)——自由活塞发气机-燃气涡轮装置的燃料消耗率。

B_0 (公斤/循环)——每循环噴入柴油机气缸的燃料量。

T (秒/循环)——每循环所需要的时间。

T_1 (秒/循环)——外行冲程所需要的时间。

T_2 (秒/循环)——回复冲程所需要的时间。

t (秒)——任意时间。

t_i (秒)——柴油机着火落后时期。

n (次/分)——自由活塞发动机每分钟所完成的循环数。

S (米)——活塞冲程。

S_c (米)——柴油机气缸的余隙容积长度。

S_a (米)——进排气孔关闭时活塞距柴油机气缸中心面的长度。

S_n (米)——气垫气缸的余隙长度。

S_x (米)——活塞在任意位置时活塞頂距內死点的长度。

D (米)——柴油机气缸直径。

b ——活塞冲程与柴油机气缸直径之比值。

D_k (米)——压气机气缸直径。

m (公斤秒²/米)——往复运动部分的质量。

F_{∂} (公斤)——柴油机气缸中作用在活塞上的气体总压力。

F_k (公斤)——压气机气缸中作用在活塞上的气体总压力。

F_b (公斤)——气垫气缸中作用在活塞上的气体总压力。

F_{mp} (公斤)——总摩擦力。

R (公斤)——气体压力及摩擦力的合力。

a (米/秒²)——活塞的加速度。

V (米/秒)——活塞的速度。

第一章 緒 論

1 自由活塞式发动机的基本概念

自由活塞发气机-燃气渦輪装置或简称自由活塞气輪机組，是由自由活塞发气机和燃气渦輪联合組成的热力装置。自由活塞发气机为一高增压对置活塞式二冲程发动机。此发动机的全部功率被增压器（压气机）所吸收，其排出之燃气

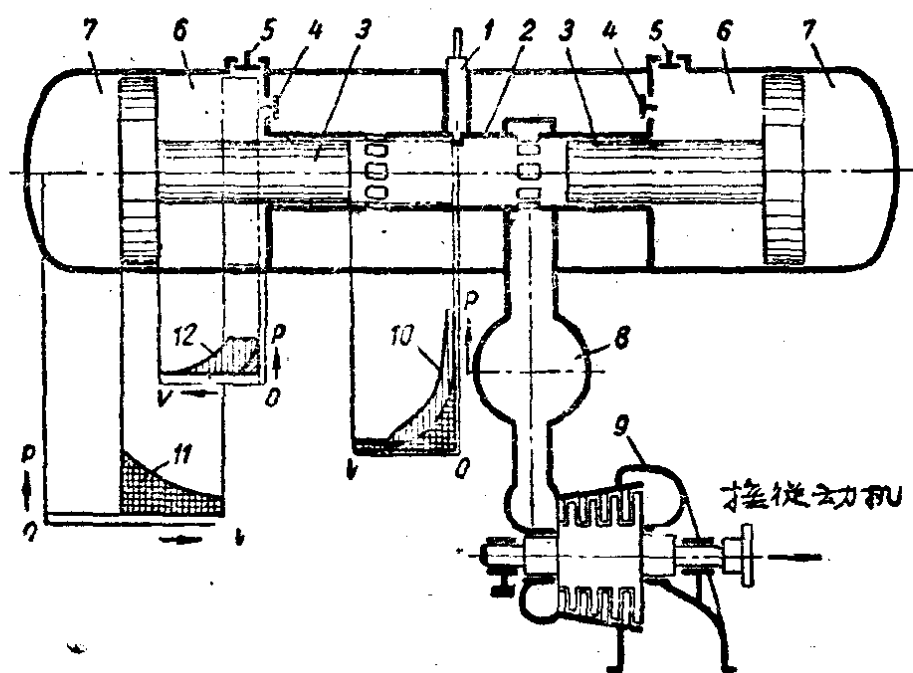


图1 自由活塞发气机-燃气渦輪装置：

- 1—噴油咀； 2—发动机气缸； 3—活塞； 4—輸气閥； 5—进气閥；
- 6—压气机气缸； 7—气垫气缸； 8—燃气儲气罐； 9—燃气渦輪。

在燃气渦輪中膨脹作功。因此，发动机本身不发出功率而成为机械式燃气发生器（或称发气机）。这种热力装置（自由活塞式发动机）的工作原理如下（图1）：

在发动机气缸（简称动力缸）2中对置着两个活塞3，它们分别与相应的压气机活塞相联接，起动前，假定发动机活塞在外死点，用压缩空气或弹簧起动机构将发动机活塞急速向内移动，压气机气缸6内的空气即被压缩并输入储气箱，供发动机扫气之用。同时动力缸内的空气也被压缩，压力和温度增高，当二活塞接近内死点时，燃料即由喷嘴喷入而燃烧。此后即进行发动机的膨胀冲程（外行冲程），活塞向外移动，压气机气缸内产生真空而从大气吸入新鲜空气，同时气垫气缸7内的空气被压缩以储存活塞回程的能量，气垫的作用与一般内燃机中飞轮的作用相似，但不完全相同。在膨胀过程終了时，右活塞首先开启排气孔，随后左活塞又开启进气孔，燃气经排气孔排入储气罐，而新鲜空气则从扫气储气箱经进气孔进入动力缸，并将残留废气清扫。这样实现了排气、扫气和吸气的过程。燃气由储气罐流入燃气涡轮内膨胀做功，由燃气涡轮轴输出功率。

当活塞到达外死点后，在气垫气缸内压缩空气储存能量的作用下，开始回复冲程（内行冲程）动力缸内和压气机气缸内的空气受到压缩。当动力缸内空气的压力和温度升高至一定值时，燃料又喷入而燃烧，燃气膨胀，又开始了发动机的膨胀冲程，整个循环又重复进行。

这样，动力缸中的工作过程同直流换气的二冲程压燃式发动机一样，压气机气缸内和气垫气缸内的过程则与一般活塞式压气机相同。但是，在这里，活塞没有连杆，也不与发动机的任何部分相连接，活塞是自由的，所以称为自由活塞式发动机。

在上述联合装置中，可以用一台自由活塞发气机来供应

一台燃气涡轮，也可用几台发气机供应一台或几台燃气涡轮。

自由活塞式发动机也可用来直接驱动活塞式压气机，用以供应压缩空气或其他压缩气体，在这种情况下，发动机与压气机装配在同一个气缸体内，发动机的活塞与压气机的活塞直接相连，发动机所发出的功率除了克服摩擦所消耗的功外，都传给了压气机，这种热力装置称为自由活塞式发动机-压气机，或简称自由活塞式压气机。

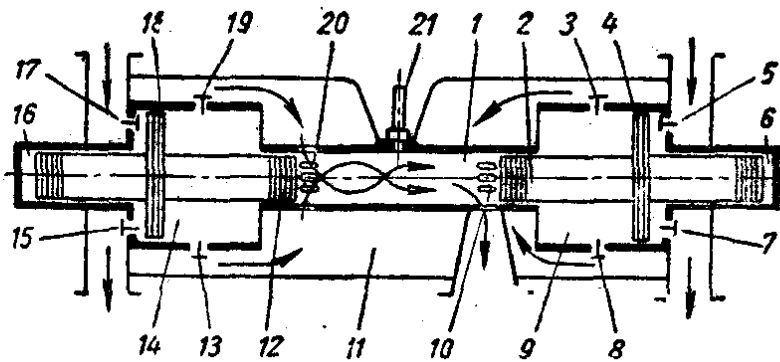


图2 自由活塞式发动机-压气机简图。

图2表示一自由活塞式发动机-压气机的简图，在发动机气缸1中的两个对置活塞2及12分别与相应的压气机活塞4和18相连接，当发动机气缸1中气体膨胀时，活塞2及12进行工作冲程。同时，压气机气缸9和14中的空气受到压缩，并经阀3、8、13和19压入扫气储气箱11。在以后的压缩过程中，空气经阀7和15被压入储气瓶中，当发动机活塞和压气机活塞向外端移动时，垫缸6及16中的空气也受到压缩，并储存能量，以供回复冲程之用。

在回复冲程中，发动机气缸内进行压缩过程，而在压气机气缸中则进行吸气过程，空气经阀5及17被吸入。