

第一章

- 1. 汽车动力系统的基本概念：从能源载体的存储和转化，到输出机械功的整个装置过程。包括从汽车发动机，经电或者机械转化，到驱动车轮的整个过程。
- 2. 汽车动力系统的分类：可分为热力，电驱动力系统。热力动力系统分为外燃机有斯特林机、蒸汽机。内燃机有往复式活塞式、旋转活塞式、自由活塞式内燃机。而电动动力系统主要是燃料电池动力系统，纯电动力系统，混合动力系统。
- 3. 常见汽车动力系统及其比较：

动力系统类型	优点	缺点	应用情况
内燃动力系统	能量密度高、行驶里程长；燃油加注方便、快捷；零部件供应链完整、齐全，维护方便、成本低。	有害物排放污染环境；传统燃料碳排放高；能量转化效率不高。	在相当长时间仍是汽车的主流动力。
纯电动力系统	行驶零排放；缓解汽车对石油资源依赖；行驶噪声低、振动小；系统效率高、使用能耗低。	行驶里程短、充电时间长；电池二次污染；电池安全性、寿命；制造成本较高。	在短距离或固定线路汽车中得到越来越广泛的应用。
燃料电池动力系统	能量密度高、行驶里程长；行驶零排放；缓解汽车对石油资源依赖。	氢的制取、存储、输运与加注难度大；燃料电池使用寿命短、成本高。	有可能在长距离货车上得到推广应用。
混合动力系统	具有节能和减排综合优势；无里程焦虑；插电式混动系统可以使用电网的电；平衡内燃动力和纯电动力。	不是零排放；成本较纯内燃动力系统高。	得到越来越广泛的应用，是未来汽车主流动力之一，大有取代内燃动力之势。

- 4. 汽车动力发展方向和趋势：汽车动力系统呈现低碳化，多元化，电动化、智能化发展趋势。

第二章：

- 1. 内燃机的定义：将燃料燃烧产生的热能转化为机械功的动力装置，包括内燃机，外燃机。内燃机的特征是燃料在机器内部燃烧，产生的热能直接转化为动力，燃烧上前工质为燃

料和空气混合气，燃烧后工质为燃烧产物。

2. 内燃机的分类：往复活塞式、旋转活塞式、自由活塞式，也包括燃气轮机。主要指往复活塞式内燃机。

3. 内燃机发展历史和发展趋势：狄塞尔发明第一部柴油机

4. 上下止点：上止点 **TDC** 是活塞顶部距曲轴中心的最远处，是活塞最高位置；下止点 **BDC** 时活塞顶部距曲轴中心最近处，是活塞最低位置。

5. 曲柄半径：曲轴与连杆下杆的连接中心距离曲轴中心的距离

6. 活塞行程：上止点到下止点的距离。

7. 燃烧室容积：活塞位于上止点时活塞上方的容积

8. 气缸总容积：活塞位于下止点时活塞上方的容积

9. 气缸工作容积：活塞从上止点到下止点扫过的气缸容积

10. 排量：各个气缸工作容积的总和

11. 压缩比：气缸总容积与燃烧室容积之比

12. 四冲程内燃机工作原理：进气，压缩，膨胀，排气

13. 二冲程内燃机工作原理：有两个行程组成。第一行程活塞自下而上运动，缸内可燃混合气被压缩，新鲜混合气从进气口被吸入到活塞下方曲轴箱内。第二行程活塞自上而下运动，活塞上方进行做功和排气过程，曲轴箱内的新鲜混合气被预压缩。两冲程发动机相对于四冲程发动机而言结构简单，起动方便，功率密度高（转的圈数多），但与此同时，二冲程

发动机的燃油经济性差，环境污染大且零件磨损大。二冲程汽油机排量小，结构简单，转速高，用于摩托车，二冲程柴油机排量大，转速低，用于低速运行轮船。扫气式二冲程有扫气过程（一边充气，一边排气）。

**14.两大机构：**曲轴连杆机构、配气机构

**15.五大系统：**点火系，供给系，冷却系，润滑系，起动系

### 第三章

**1. 功：**压力与活塞运动方向相同则是正功，反之负功，进气和膨胀冲程是正功，而压缩和排气冲程是负功。冲程功是在一个冲程内所做的功，循环功是所有冲程所做的功。动力过程功是压缩和膨胀冲程所做的功，泵气过程功是进气和排气工程所做的功。

**2. 理论泵气功：**是忽略流动阻力，进排气冲程功之和。

**3. 实际泵气功：**是考虑流动阻力，进排气冲程功之和。此时进气压力要低于大气压力，排气压力要高于大于压力，导致此时实际泵气功为负功。

**4. 泵气损失功：**是理论泵气功减去实际泵气功。此时为正功。

**5. 总指示功：**是没有泵气损失时的循环功。是动力过程功和理论泵气功之和。

**6. 净指示功：**是考虑泵气损失时的循环功。是动力过程功和实际泵气功之和。

7. 增压发动机的功：缸内进气压力是压气机压力  $P_b$ ，排气压力是蜗轮压力  $p_k$ 。动力过程功不变，理论泵气功变为  $(p_b - p_k) \cdot V_s$ ，实际泵气功是考虑泵气损失之后的，和自燃吸气类似，但是实际泵气功进气压力  $p_d$  要大于排气压力  $p_e$ ，故实际泵气功是正值。泵气损失功依旧是理论泵气功减去实际泵气功。

8. 指示性能指标：以工质对活塞做功为计算基准的是指示性能指标。注意只有与功相关的指标才有指示和有效之分，包括热效率，转矩，平均压力，油耗！

9. 有效性能指标：以曲轴输出功为计算基准为有效性能指标。

10. 循环指示功：循环有效功加上机械损失功。但不考虑泵气损失功时，循环指示功变为净指示功，机械损失功=摩擦损失功+附近损失功。考虑泵气损失功时，循环指示功变为总指示功，机械损失功要加上泵气损失功。

11. 平均压力（单位 MPA）：为分指示平均压力（IMEP），有效平均压力（EMEP），机械损失平均压力（MMEP）是单位气缸工作容积所做的循环功（循环指示功，循环有效功，机械损失功）。可以假象有一个压力作用在活塞上，使其移动一个冲程所做的功即是循环功。使不同的发动机动力性有可比性。增压>自燃吸气，柴油机>汽油机。

12. 功率（单位 KW）： $p = Tn = w/t$ ， $t = n / (\text{转} \cdot 30)$ ，注意功率和转矩都是对于整个发动机，排量而言的。而平均压力是单个气缸。有效功率除以指示功率等于机械效率。

- 13.燃料热值：即低热值  $H_u$ ，单位  $\text{KJ/Kg}$ 。
- 14.燃料流量  $B$ ：单位  $\text{Kg/h}$ 。
- 15.燃油消耗率（整个发动机而言）：分为有效(ESFC)，指示（ISFC）和机械(MSFC)。单位是  $\text{g}/(\text{kw}\cdot\text{h})$ 。有效和指示可用  $1000B/p$  或者  $3.6\cdot 10^6/(\text{效率}\cdot\text{低热值})$ 。机械燃油消耗率是用有效除以指示。
- 16.效率：针对整个发动机而言。分为有效效率，指示效率和机械效率。指示和有效效率可以表示为  $3600p/(B\cdot H_u)$ 。机械是有效除以指示。
- 17.功率密度评价指标：比功率（强化度）（单位排量）汽油机大于柴油机，转速高，燃烧速率快，比质量和比容积（单位有效功率）
- 18.活塞平均速度：内燃机强化指标，与转速不同。
- 19.决定动力输出的“质”“量”环节：“量”指的是单位时间加入化学能的多少包括  $H_u$  和  $B$ ，“质”指的是加入燃料的化学转化为输出功的效率。
- 20.过量空气系数：是单位燃料燃烧实际供给的燃烧比上单位燃料燃烧理论消耗的质量。 $>1$  是稀混合气， $<1$  是浓混合气， $=1$  化学计量比混合气。过量空气系数  $=I/I_0$
- 21.空燃比  $I$ ：混合气空气和燃料之比  $=A/F=\text{过量空气系数}\cdot I_0$ 。
- 22.燃空当量比：  $1/\text{空燃比}$
- 23.可燃混合气热值  $H_{um}$ ：单位质量可燃混合气发出的热量。

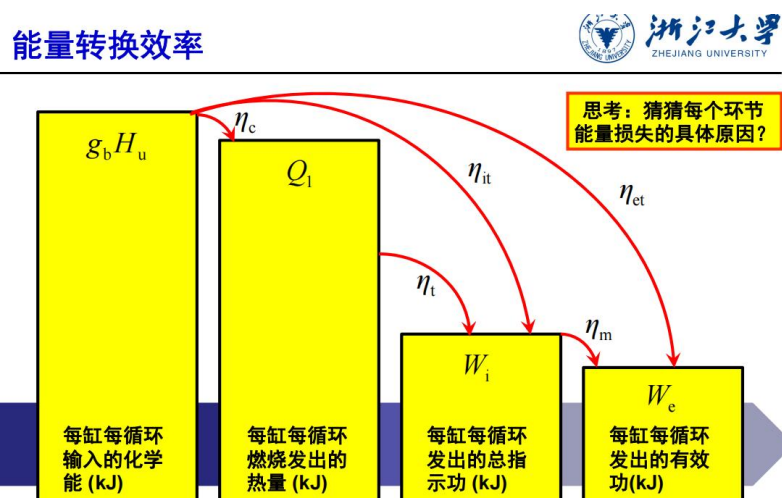
$Hum = Hu / (1 + \text{过量空气系数} \cdot l_0)$ ,  $Humv = Hu / v_s = Hum \cdot \text{密度}$ 。  
 $Hu$  越大, 越容易携带,  $Hum$  越大则相同条件发出的功率越大。

24. 充量系数: 每缸每循环吸入缸内的新鲜空气与理论进气量之比。充量系数 = 空气质量 / (大气或者增加空气密度 \*  $v_s$ )

1) 燃烧效率 Combustion Efficiency	$\eta_c = \frac{Q_1}{g_b H_u}$	每缸每循环燃烧时发出的热量 (kJ)
2) 循环热效率 Thermal Efficiency	$\eta_t = \frac{W_i}{Q_1}$	总指示功
3) 机械效率 Mechanical Efficiency	$\eta_m = \frac{W_e}{W_i}$	曲轴输出功
4) 有效效率 Effective Efficiency	$\eta_{et} = \eta_c \eta_t \eta_m = \eta_{it} \eta_m = \frac{W_e}{g_b H_u}$	指示效率

正常燃烧:  
 汽油机  $\eta_c = 95\% \sim 98\%$   
 柴油机  $\eta_c = 98\% \sim 99\%$

25.



26.

# 功率和油耗的表达式



循环热效率 (热力循环)

燃烧效率 (燃烧过程)

机械效率 (机械损失)

进气充量 (换气过程)

混合气热值 (燃料特性)

$$P_e = \frac{\eta_{et} G_m H_{um}}{3600} = \eta_c \eta_t \eta_m \left( \frac{H_u}{\phi_a l_0} \right) \phi_c V_s \left( \frac{p_s}{R_s T_s} \right) \left( \frac{in}{30\tau} \right)$$
$$b_e = \frac{3.6 \times 10^6}{\eta_c \eta_t \eta_m H_u} = \frac{3.6 \times 10^6}{\eta_{it} \eta_m H_u} = \frac{3.6 \times 10^6}{\eta_{et} H_u}$$

## 27. 了解影响动力性和经济性的主要环节和因素：

### 第四章：

1. 一次能源与二次能源：二次能源是一次能源转化而来的能源载体，动力选择本质是二次能源的选择。
2. 内燃机燃料和烃燃料分类：

### 内燃机燃料分类



分类方法	燃料种类	燃料
按来源分	矿物质燃料	汽油, 柴油, 压缩天然气 (CNG), 液化天然气 (LNG), 液化石油气 (LPG) 煤制甲醇, 煤制二甲醚 (DME), 煤制柴油 (CTL), 天然气制柴油 (GTL) 等
	生物质燃料 (碳中和燃料)	各种植物油, 如菜籽油、豆油、棉籽油、棕榈油、椰子油和葵花油等 植物油或动物油脂加工成的酯类化合物 (生物柴油) 生物燃料制柴油 (BTL) 植物或农作物制取乙醇等
按代用或着火方式分	点燃 (SI) 燃料	汽油, CNG, LPG, 甲醇、乙醇、氢气等
	压燃 (CI) 燃料	柴油, 生物柴油, DME, CTL, GTL, BTL 等
按形态分	气体燃料	氢气, CNG, LNG, LPG, DME, 煤气, 沼气等
	液体燃料	汽油, 柴油, 甲醇, 乙醇, 生物柴油, BTL, CTL, GTL 等
	固体燃料	煤粉 (与燃料油或乳化剂混合)
按化学成份分	烃类燃料	汽油, 柴油, CNG, LNG, LPG, BTL, CTL, GTL 等
	醇类燃料	甲醇, 乙醇等
	醚类燃料	甲基叔丁基醚 (MTBE), 乙基叔丁基醚 (ETBE), 叔戊基甲醚 (TAME), 二甲醚 (DME), 二异丙基醚 (DIPE), 二正戊基醚 (DNPE) 等
	酯类燃料	生物柴油 (甲酯), 合成酯
	氢/氢燃料 (碳中和燃料)	氢气/液氢、氨气/液氨 (氢载体)



3. 自燃性：正十六烷值，由正十六烷值和阿尔法-甲基萘组成。

4. 抗爆性：辛烷值。由异辛烷到正庚烷。有 RON 和 MON 两种测量法，

**RON > MON(大多数燃料)**  
**燃料敏感性  $S_a = \text{RON} - \text{MON}$**   
**抗爆指数  $A_i = (\text{RON} + \text{MON})/2$**

5. 蒸发性：蒸发性越好，则冷启动性能越好，燃油越轻质，混合气形成也就越快，有利于燃烧。过大会导致散失。

6. 烃燃料组分、c 原子数和分子结构对燃料理化特性影响：化学安定性和物理稳定性成反比，化学安定性越好，则自燃性好，抗爆性差。碳原子数越多，化学安定性越好，有支链，不饱和键则物理稳定性不好，化学安定性越好。 $H/c$  越大，则燃料热值越大，烷烃最大，汽油>柴油，但是 H 多所消耗空气也多，故汽油机热值=柴油机。 $H/c$  越大，燃料越清洁。

7. 含氧燃料结构及其对燃料理化特性影响：醇有氧可促进燃烧，醚，酯黏度太大要酯化发应得甲酯才能用。

8. 质量化学计量空燃比：碳在燃料中的质量乘以  $8/3$ +氢在燃料中的质量乘以 8-氧的质量。

9. 摩尔化学计量空燃比：碳在燃料中的质量分数/ $12$ +氢在燃料中的质量分数/ $4$ -氧的质量/ $32$ .单位  $\text{Kmol/kg}$ 。

10.分子变化系数：汽油机要大于柴油机，汽油机 H 多，



体积增加得多，柴油机过量空气系数大，有些空气不参加反应，其前后体积不变。

11.残余废气系数：进气结束后，残余废气和新鲜进气之比。废气再循环 EGR，汽油机残余废气较大是因为压缩比小，燃烧室容积大，废气排的相对减少，小负荷是进气量减少相对增大。增压柴油机小是因为扫气扫出去了。

### 各种燃料的混合气热值比较



$$(H_{um})_v = \frac{\rho_m H_u}{1 + \phi_a l_0}$$

- 汽、柴油等液体烃，随H/C升高， $H_u$ 也升高；但H燃烧时所需的空气量比碳燃烧时多，因此 $H_{um}$ 基本相同
- 气体烃 H/C高， $H_u$ 高，但本身是气体(密度小)，加上H燃烧要求空气多， $H_{um}$ 小
- 含氧燃料(甲、乙醇)本身含O， $H_u$ 低，但需空气也少( $l_0$ 小)， $H_{um}$ 与汽、柴油相近
- 纯 $H_2$ 的 $H_u$ 最高，但气体占体积(密度小)，且需空气多， $H_{um}$ 反而小

#### 结论：

- 各种燃料 $H_u$ 差别较大，但不等于 $H_{um}$ 也有相同差别
- 液体燃料 $H_{um}$ 大体相同，气体燃料 $H_{um}$ 偏低

12.

## 第五章：

### 1. 内燃机热力循环分析模型分类：

根据工质和循环特征分类:

工质和循环模式是决定循环热效率的两大因素

1) 理论循环(Theoretical Cycle)

工质——理想气体空气, 物性参数( $c_p, c_v, k$ )为常数, 不随温度变化, 准稳定/内可逆

循环——理想热机循环:

封闭热力循环: 系统加热→燃烧放热; 系统放热→气体交换(进排气)

特殊热力过程: 绝热等熵压缩和膨胀; 等容或等压加热; 等容放热

2) 理想循环(Ideal Cycle)

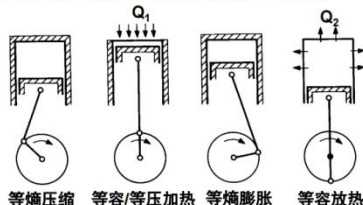
工质——真实工质

循环——理想循环

3) 真实循环(Real Cycle)

工质——真实工质

循环——真实循环



2. 奥托循环是等容循环（具有更高的热效率），狄塞尔循环是等压循环。

现代汽油机和柴油机的实际工作循环是混合循环。相对而言，传统汽油机更接近于等容循环，传统柴油机更接近于等压循环。

3. 影响理论循环热效率的四大参数及影响规律:

四大循环参数: 1) 压缩比 $\varepsilon$ ; 2) 等熵指数 $\kappa$ ; 3) 压力升高比 $\lambda$ ; 4) 预膨胀比 $\rho$

压缩比越大, 等熵指数越大, 热效率越大。对于等容加热循环, 预膨胀比不变, 压力升高比没影响。对于等压加热循环, 压力升高比不变, 预膨胀比越大, 热效率越低。对于混合加热循环, 压力升高比越大, 热效率一开始增大后来不变, 预膨胀比越大, 热效率降低。

4. 考虑真实工质特性对循环热效率的影响: 首先是比热容和等熵指数, 比热容上升导致等熵指数降低, 温差升高, 效率增加。然后是高温热分解使等容度下降导致热效率降低。然

后工质分子变化系数影响不大；最后是过量空气系数时， $<1$  时候降低， $>1$  时候升高。且会导致汽油机燃油机热效率影响进一步增大。

5. 导致真实循环热效率下降的因素及原因：传热损失，燃烧提前损失以及后燃损失。换气损失，不完全燃烧损失，缸内流动损失，工质泄露损失。

5.从工质和循环角度理解柴油机比汽油机热效率差异成因：

### 汽油机与柴油机理想循环热效率的比较



考虑真实工质特性后，汽、柴油机热效率差距加大：

#### 1) 高负荷

- 柴油机  $\phi_a >$  汽油机  $\phi_a \rightarrow$  柴油机  $\eta_t >$  汽油机  $\eta_t$
- 汽油机压缩比小，但混合气浓且等容度高， $T_{\max} \uparrow$ ，残余废气  $\uparrow \rightarrow \kappa \downarrow$ ，热分解  $\uparrow \rightarrow$  汽油机  $\eta_t \downarrow$
- 汽油机  $\mu >$  柴油机  $\mu$ ，但影响不大

#### 2) 低负荷

- 汽油机  $\phi_a$  更小，而柴油机  $\phi_a$  更大  $\rightarrow$  汽油机  $\eta_t \downarrow \downarrow$
- 汽油机  $\phi \uparrow$ ，柴油机  $\phi$  不变，汽油机  $\kappa \downarrow$ ，燃烧速度  $\downarrow \rightarrow$  汽油机  $\eta_t \downarrow$
- 汽油机高、低负荷  $\phi_a$  变化不大，温差小， $T_{\max} \uparrow \rightarrow \kappa \downarrow \rightarrow$  汽油机  $\eta_t \downarrow$

5. 机械损失的构成、测量方法及适用机型，影响机械效率因素：

### 小结:

- (1) **示功图法**可以适用于任何发动机
- (2) **汽油机**压缩比小、功率比较小，因而多用倒拖法，不适合用灭缸法(灭缸不安全、进排气干扰)和油耗线法(不成直线)
- (3) **自然吸气柴油机**适合灭缸法、油耗线法，小型柴油机可以用倒拖法
- (4) **涡轮增压柴油机**无法使用倒拖法和灭缸法，低增压可以用油耗线法，高增压发动机只能采用示功图法。

### (1) 活塞平均速度

- $v_m \uparrow$ , 摩擦阻力 $\uparrow$ , 惯性力 $\uparrow$ , 泵气损失 $\uparrow$ ,  $\eta_m \downarrow$

### (2) 负荷

$$\eta_m = 1 - \frac{P_m}{(P_e + P_m)}$$

- 负荷 $P_e \downarrow$ ,  $\eta_m \downarrow$
- 怠速 $\eta_m = 0$
- 增压机型 $P_m \uparrow$ ,  $P_e \uparrow$ , 总 $\eta_m \uparrow$

### (3) 润滑条件

- 机油粘度: 冷起动和低温不能过高; 高温时不能过低
- 水温 $80 \sim 95^\circ\text{C}$ , 机油温度 $85 \sim 110^\circ\text{C}$

→  $\pi$   
影响

6. 内燃机能量利用现状、循环效率提升和散失能量再利用措施: 可以促进完全燃烧, 促进稀燃, 减少摩擦损失, 改善工质条件, 较少传热损失, 避免工质泄露, 减少流动损失, 附近电动化减少摩擦损失, 优化喷油规律。有废气涡轮增加发动机, 复合增压发动机, 低散热发动机。

**1/3有用功 + 1/3排气带走热 + 1/3冷却液带走热  
提高有效效率和散失能量再利用**

## 第六章: (前两个很重要)

1. 四冲程的换气过程: 从膨胀冲程排气门开启到压缩冲程进气门关闭的全过程。
2. 换气过程定义: 是充入新气和排出废气的全过程。
3. 合理组织换气过程的目的: 尽可能提高充量系数, 最大限度充入新鲜充量, 也要保证各缸进气均匀, 减小换气损失, 在缸内形成合理的流程, 以控制和安排燃烧。



4. 换气过程分期：分为排气过程，进气过程和气门重叠过程。排气过程由自由排气阶段（ $1/3$  时间排 0.6 废气）和强制排气阶段（ $2/3$  时间排 0.4 废气）组成。

5. 配气相位角含义及影响：排气早开角影响自由排气损失和泵气损失，不影响充量系数，且排气早开角越大，泵气损失越少，自由排气损失越大，转速越大，泵气损失越大，自由排气损失越小。排气晚关角，惯性，过大会废气倒流。进气早开角，过小进气不足，过大废气倒流。进气晚关角，影响充量系数，过小惯性利用不够，过大，新气被推回进气管。自吸式汽油机，气门重叠角过大会废气回流。增压式柴油机，气门重叠角可以利用扫气排出废气，降低热负荷。

### 结论：

- ❑ 随转速升高，最佳相位角应增大
- ❑ 四个相位角中，进气晚关角对充量系数影响最大，排气早开角对换气损失影响最大
- ❑ 最佳相位角，增压机与非增压机不同
- ❑ 气门重叠角：汽油机 < 柴油机 < 增压机

6. 充量系数定义：每缸每循环实际充入新鲜充气的质量和理论计算所得气体量之比，充量系数有可能大于 1，增压技术。

7. 影响因素：流动阻力（以局部阻力大于沿程阻力，马赫数大于 0.5，充量系数会猛然下降，要降低进气马赫数，可提高气门流通面积，采用多气门技术，多气门技术还可以火花

塞中心布置以提高压缩比(汽油机)或者混合气形成质量(柴油机),还可以灵活控制进气涡流,有利于组织混合气形成,优化燃烧)。进气温升(进气温升越大,充量系数越小,高温壁面引起温升  $T_w$  影响最大、残余废气引起的温升  $T_r$ , 压力引起的摩擦温升  $T_L$ , 气体吸热引起温升  $T_g$  负值)。配气相位,压缩比(正比),燃料汽化(负相关),排气压力(反比例)。

8. 进气速度特性: 油量调节机构不变时, 发动机充量系数随转速或者活塞速度的变化。对于汽油机, 转速增大, 充量系数降低, 且部分负荷时, 充量系数降低得更快。对于柴油机, 转速增大, 充量系数也降低, 但是部分负荷时, 充量系数增大。

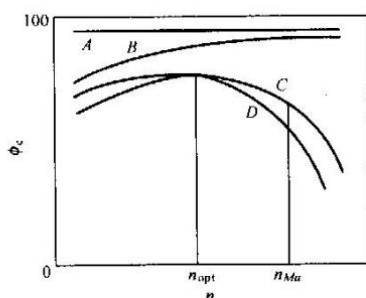
9. 因素: 发动机每个符合下都有最佳的进气需求角, 进气晚关角增大, 则高速充量系数改善。减小则低速充量系数改善, 用可变配气正时技术 **VVT** 来适应不同符合下进气相角配位需要, 兼顾高速的大功率和低速的大扭矩。

## 1. 四冲程内燃机换气过程

## 2. 充量系数及其影响因素 →

## 3. 进排气系统动态效应

## 4. 内燃机增压系统



汽油机稳流条件下  $\phi_c$ - $n$  进气速度特性线的变化过程

## 4) 稳态进气速度特性

■ 各因素对进气速度特性变化趋势的影响分析：

- A—燃料气化：燃料占体积， $\phi_c$ 减小，且不随转速变化
- B—进气温升：低速传热时间加长， $\Delta T_a'$ 偏高，高速则低一些
- C—流动阻力：随转速平方而增加，是每个转速都具有最佳进气晚关角时的进气速度特性曲线
- D—进气晚关角固定时的进气速度特性曲线，高转速进气晚关角偏小，进气惯性没有充分利用，低转速进气晚关角偏大，部分充量有回流

10.: 压力传播方向沿管道正方向是右行波使该处压力增大是压缩波。

右行压缩波： $dp_R(+)$ ,  $dv_R(+)$

右行膨胀波： $dp_R(-)$ ,  $dv_R(-)$

左行压缩波： $dp_L(+)$ ,  $dv_L(-)$

左行膨胀波： $dp_L(-)$ ,  $dv_L(+)$

11.进排气动态效应：压力波动对进排气过程的影响

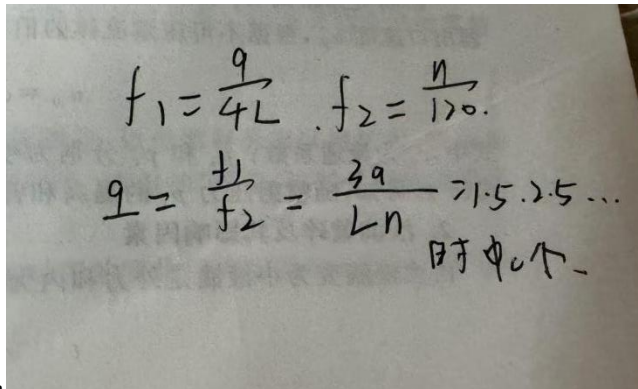
12.对充量系数进排气均匀的影响：如果压力波能在进气后期到达气门口，也就是压力波传播时间  $t$  小于进气门开启时间  $t_s$ ，则充量系数可以提高。同事要求转速和管长要配合， $L$  太大，压力传播过来气门已经关闭， $L$  太小，则多次往返的密波和疏波相互抵消。且上循环残余压力波能达到本循环的



节气门，则对充量系数有提高。

**13.可变进气管技术：**用来利用上循环压力波动态效应，让转速和管长配合以利用上循环压力波动态效应提高充量系数。

**14.增压度和增压比概念，增压系统分类和各自特点：**增压度是增压后功率增值和原功率之比，增压比是压气机出口压力和压缩前之比。增压系统有：  
1. 涡轮增压（提高燃油经济性和高功率密度，高速特性），  
2. 机械增压（保证低速低负荷下的特性）



Handwritten mathematical derivation:

$$f_1 = \frac{q}{4L}, f_2 = \frac{n}{120}$$
$$\eta = \frac{f_1}{f_2} = \frac{3q}{Ln} \approx 1.5 \cdot 2.5 \dots$$

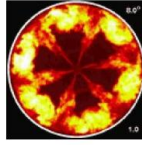
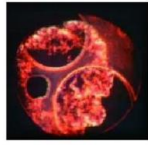
时  $\phi_0$  个

**15.**

## 第七章：

**1. 燃烧定义：**可燃物质与氧化剂产生剧烈的化学反应，并伴有流动，传热，传质等物理现象。内燃机的燃烧是气相燃烧。

**2. 预混燃烧和扩散燃烧对比：**



预混燃烧(汽油机) Pre-mixture Combustion	扩散燃烧(柴油机) Diffusion Combustion
燃烧速度取决于化学反应速度，即混合气温度和浓度（混合气形成影响不大）	燃烧速度取决于燃油和空气的混合速度（混合气形成的影响大）
$\varphi_a=0.8-1.2$ ，稀燃存在极限	$\varphi_a=1.2-6.8$ ，宽广范围稳定稀燃
浓度和温度分布均匀，不易产生碳烟	浓度和温度分布不均匀，易产生碳烟
无焰（蓝色）燃烧	有焰（黄或白色）燃烧
有回火危险	无回火危险

3. 混合气的热着火理论和链式反应理论：热着火理论时是靠热量的积累，即放热速率大于散热速率，无法解释初始浓度较低和压力低的情况。链式着火理论，只要用辐射电离等原因激发活性中心即可燃烧，通过链式反应发生反应。

- 柴油机压燃和汽油机爆燃属于低温多阶段着火
- 汽油机点燃和柴油机后燃属于高温单阶段着火

4.

### ■ 喷油规律

①基本概念：喷油速率随曲轴/凸轮轴转角的变化关系。

②三要素：喷油始点、喷油持续期和喷油速率曲线形状。

5. 柴油机油-气-室混合气形成方式：空间雾化混合

6. 柴油机燃烧过程分期及各段燃烧过程特点：着火落后期（压缩线偏离点或者放热量相对曲轴转角为 0 的点，要控制预混合气形成量）、速燃期、缓燃期（加快混合气形成速度，缓燃期不缓）、后燃期（后燃期不后，缩短后燃期）。

7. 放热规律的三要素及各段燃烧过程特点：放热始点（使发热率中心接近于上止点，让等容度上升，转速提前，负荷提前），放热持续期（越短越好，可以预膨胀比下降），放热率形状（先急后缓则热效率高但是排放多，先缓后急则排放少但是效率也低）。总的来说是放热始点调整让放热率中心接近于上止点，以提高等容度，放热持续期尽量缩短，放热率形状应该先缓后急。要做到控制燃油喷射，合理组织气流运动，合理设计燃烧室形状。

8. 粗暴燃烧、燃烧噪声产生机理与抑制措施：粗暴燃烧是由于滞燃期燃料较多形成了较多可燃混合气，在速燃期一起燃烧使燃烧初期压力升高率过高而产生粗暴燃烧。发生在速燃期前期，粗暴燃烧时缸内压力均匀，无激波产生。而燃烧噪声也是在速燃期产生，由于气体动力载荷发动机零件部分振动以及压力波导致高频振动。可以缩短滞燃期，减少着火落后期产生可燃混合气，减少滞燃期喷油量，提高冷却水温度和进气温度。

## 第八章：

1. 汽油机燃油雾化以及混合气形成方式：化油器（效率低，成本低，性能差，已淘汰），进气道喷射（PFI，燃油经济动力性较化油器有所提升），缸内直接喷射（GDI，燃油经济性提升，整体稀燃，局部浓燃）

**2. PFI 汽油机混合气形成：**首先是进气道的喷油雾化蒸发（在进气门开启之前就开始喷射，一部分直接在空间直接雾化，一部分在进气道壁面和进气阀背面形成油膜，进气阀附件有高浓度汽油蒸汽），然后是缸内蒸发混合（进气门开启之初，气门附近的混合气极其不均匀，进气时候的活塞下行和压缩过程中的活塞上行使混合气逐渐均匀，促进燃油的蒸发和混合，在进气阀附近的混合气稍浓，气阀附近有油膜，压缩时候蒸发导致），喷射策略（低速小负荷闭阀喷射，低速大负荷开阀喷射，高速高负荷，喷油器  $720^\circ$  喷射）

**3. GDI 汽油机混合气形成：**GDI 汽油机燃料直接喷入燃烧室，通过缩短混合气形成时间制造缸内分层混合气，超过稀燃极限，实现节油。分为均质当量比 GDI（进气冲程早喷），分层稀燃 GDI（压缩冲程晚喷）。总体过量空气系数大于 1，火花塞附近小于 1 保证稳定着火，分为壁面引导，气流引导，喷雾引导。但是分层稀燃 GDI 难以满足排放要求，而且难以控制，组织不好排放会增加，而均质当量比 GDI 成为主流，喷雾蒸发吸热使温度降低，让充量系数提高，压缩比提高，爆燃倾向提高。

**4. 混合气形成基本要求：**要形成均质混合气，具有良好的响应特性，适应外界工况剧烈变化，适应不同需要的混合气浓度（**0.85-0.95** 的功率混合气烧燃速度最快分子变化系数大，**1.1-1.2** 的经济混合气燃烧最充分，**1** 的排放混合气可以让三

元催化转化器工作在最佳水平），合理的缸内气流运动。

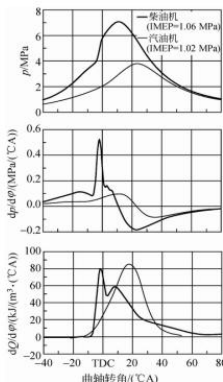
5. 均质混合气的火花点火以及火焰燃烧：火花点火短而复杂，有击穿阶段，电弧放电，辉光放电，火核形成。火焰燃烧是层流火焰--火焰前锋面结构，前锋面释放能量占百分之九十以上，烃燃料厚度 **1mm** 左右传播速度  $<1\text{m/s}$ ，当过量空气系数为 **1** 时，点火能量最小，但当过量空气系数 **0.4-1.4** 接近于稀燃或者浓燃极限时候，可燃混合气点火能量趋近于无穷大，点不燃。对于湍流，微元气体脉动使火焰前锋面出现褶皱，增加与空气接触的表面积，微元气体脉动使火焰前锋面传热性质反应进程加强，使火焰传播速度加快。提高混合气的湍流程度是改善汽油机燃烧的有效手段。

6. 汽油机燃烧过程后期及各段燃烧过程分期：着火落后期（已经是高温单阶段燃烧，火焰传播，累计放热 **5%**相位截止，**CA05**），明显燃烧器（速燃期，累计放热 **50%**相位，期间百分之 **80-90** 燃料被燃烧），后燃期（燃料剩余百分之十，火焰前锋面扫过未燃烧的区域、壁面附件未燃混合气，高温热分解的 **CO**、**OH**，后燃期要短，不然效率下降，排温升高，三元催化老化，放炮），点火提前角是着火落后期开始到上止点提前到曲轴转角，点火提前角对着火落后期和速燃期有重大影响，影响最大爆发压力的位置，最大爆发压力通常要在上止点后 **10-15** 度位置。

7. 汽油机与柴油机燃烧特性差异及成因：

## 主要内容

1. 混合气形成及要求
2. 火花点火与火焰传播
3. 燃烧过程及其特点
4. 异常燃烧及其控制
5. 燃烧室及其特性



## 2) 汽油机与柴油机燃烧特性对比

- 放热速率  $dQ/d\phi$ :
  - 放热持续期—汽短，柴长
  - 放热率形状—汽单峰，柴双峰（高负荷）
  - 初期放热率—柴油机▲，汽油机▲
  - 放热率重心—汽油机CA50，柴油机靠前
- 示功图 ( $p-\phi$ ):
  - 压缩压力和燃烧压力  $p_{\max}$ —柴>汽
- 压升率 ( $dp/d\phi$ ):
  - 柴>汽， $dp/d\phi$ 低，NO<sub>x</sub>和噪声低
- 负荷影响:
  - 汽油机负荷减小时燃烧持续期变长；
  - 柴油机负荷减小时燃烧持续期缩短；
  - 中小负荷时汽油机燃烧等容度会更加低于柴油机（放热持续期+放热形状）。

## 8. 汽油机异常燃烧类型，成因及抑制措施：

### 1) 异常燃烧概述

#### □ 汽油机不正常燃烧

- 爆燃/爆震、爆轰/超级爆震
- 表面点火

#### □ 汽油机不规则燃烧

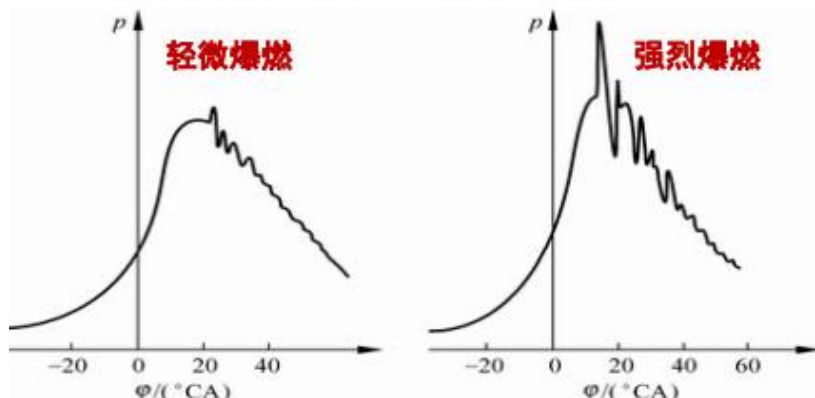
- 循环波动：不同循环之间的燃烧变动
- 各缸不均匀（进气不均匀）：各缸之间的燃烧差异



## 2) 爆燃的机理与对策

### (1) 爆燃现象 (Knocking)

- ❑ 示功图出现不同程度的“锯齿波”
- ❑ 尖锐的金属敲击声，声频为3~7KHz
- ❑ 机身有明显振动
- ❑ 功率下降、转速不稳，甚至冒黑烟
- ❑ 冷却水、机油和气缸盖等温度升高



浙江大学  
ZHEJIANG UNIVERSITY

## 2) 爆燃的机理与对策

### (2) 常规爆燃机理

- ❑ 火花点火后，燃烧产生压力波和热辐射；
- ❑ 末端混合气 (End gas) 受压缩和热辐射，温度压力上升，燃前反应加速，严重时会以低温多阶段方式产生自燃 (Self-ignition)；
- ❑ 多点大面积自燃，形成局部温度压力陡升（瞬时压力18MPa），压力波在传播过程中形成“激波”；
- ❑ 激波冲击燃烧室壁面产生高频振音（也有说共振），并在示功图上可观察到这种压力波动。

注意：

- 火焰前锋面速度（湍流）<100m/s
- 压力波和热辐射分别为音速和光速

爆燃原因：末端混合气自燃

合气  
区

气自燃



## 主要内容

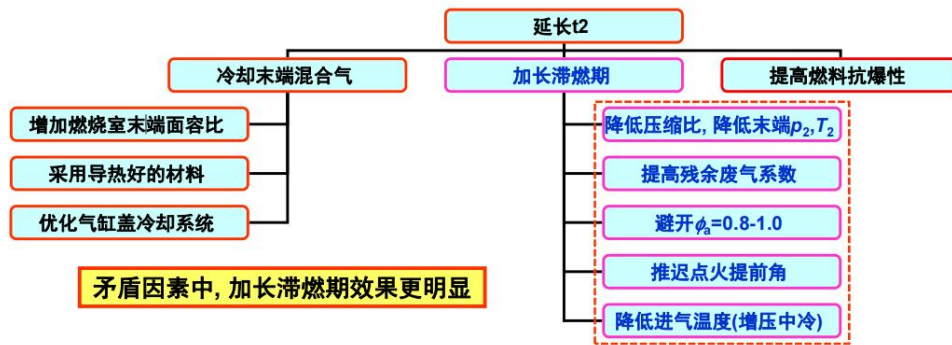


1. 混合气形成及要求
2. 火花点火与火焰传播
3. 燃烧过程及其特点
4. 异常燃烧及其控制
5. 燃烧室及其特性

### 2) 爆燃的机理与对策

#### (5) 防止爆燃的对策

- 记:  $t_1$ —由火核形成至火焰锋面传播到末端混合气所需时间;  $t_2$ —由火核形成至末端混合气自燃着火所需时间;
- 则: 不爆燃的条件  $t_1 < t_2$ 。



汽油机设计难题: 在无爆燃条件下提高压缩比。

表面点火: 燃烧室高温壁面点燃可燃混合气引起的不正常燃烧, 通常在内燃机高负荷高速长时间运行后产生, 分为早燃和后燃, 早燃可能引发爆燃, 看是否引起末端可燃混合气自燃及自燃后火焰传播形式, 抑制措施和防止爆燃的类似, 降低压缩比, 压缩中冷, 减小点火提前角, 合理设置燃烧室形状, 冷却排气门火花塞, 减少汽油中重馏分, 选择点火能量大的材料, 提高材料抗爆性。

循环波动: 内燃机转速和转矩波动, 由于火花塞附近混合气成分波动(残余废气系数, 过量空气系数), 火花塞附近气体运动状态波动。过量空气系数影响最大, 且 0.8-1 时即是效率混合气时候影响最小, 气流运动有影响, 负荷下降导致残余废气系数大, 转速下降, 湍流程度下降都会使循环波动

加剧，同时提高点火能量，多点点火可以有所改进。

9. 汽油机燃烧室设计原则及典型燃烧室：燃烧室结构紧凑，面容比越小越好（燃烧距离短，减少爆燃倾向，效率高，放热效率高，等容度高，排放少，散热损失少，可以提高压缩比），燃烧室几何形状合理，火花塞布置合理（距离末端混合气距离近，靠近高温炽热区布置，便于扫气降低残余废气系数，可以降低材料对辛烷值的需求），组织合理气流运动（可降低循环波动率，但也不可过强，会着火困难增加损失），足够的进排气门流通截面，典型燃烧室蓬形燃烧室，面容比小，燃烧效率高，动力性强，但工作较为粗暴，排放较高，是主流。

## 第九章：

1. 内燃机排放污染物的种类与危害：有排气污染物和非排气污染物，常规污染物和非常规污染物。有四大污染物：**CO**、**NOX**、**HC**、**PM**。**CO** 与血红蛋白结合导致血液输氧能力大大降低。**NOX** 中的 **NO2** 对血液输氧能力的障碍远高于 **co**，**NOX** 是酸雨、光化学烟雾的主要成分。**HC** 形成的烯烃也是光化学烟雾的组成成分。芳香烃致癌。**PM** 形成雾霾，导致哮喘，致癌。

2. 排放污染物生成机理与影响因素：

**CO**：不完全燃烧的产物，均质混合气（过量空气系数小于 1

的缺氧燃烧例如起动加速高负荷怠速，过量空气系数大于 1 的局部缺氧混合不均）减速失火，非均质混合气（混合不均缺氧），二氧化碳高温裂解，HC 在排气中不完全氧化生成 CO。

**NOX:** 是 NO（主要）+NO<sub>2</sub>（少量）+N<sub>2</sub>O（可以忽略），由高温 NO，激发 NO，燃料 NO 三部分组成，生成三要素：高温富氧（温度越高，氧浓度越高，NO 越多）和相对反应时间（反应缓慢，发动机结束燃烧也到不了平衡浓度）

**HC:** 汽油机中----不完全燃烧+壁面淬熄效应+油膜和积碳吸附（燃烧过程中吸附 HC，排气过程释放躲过一劫）

柴油机中---不完全燃烧+二次喷油或者后滴+燃油滞留压力室低速进入燃烧室难以燃烧。燃油雾化情况差。

还有非排气 HC: 来自燃油供给系统和曲轴箱。

**PM:** 和 NOX 生成条件相反，要在高温缺氧条件生成，由炭烟生成，炭烟氧化，微粒生成三个步骤。由于炭烟，可溶有机成分，硫酸盐三部分组成。

总的来说，NOX 要在高负荷，加速高速启动，高温富氧，燃烧温度高时候增加，CO 在怠速加速的过量空气系数变小混合气加浓条件下产生，HC 是在减速，残余废气高，循环波动大时候增加。

### 3. 汽油机内净化与后处理技术:

内处理技术: 推迟点火时间（加长滞燃期，使等容度下降，

排气温度升高，油耗升高，功率下降，但 **NOX** 下降，**HC** 下降）废气再循环（**EGR**，残余废气系数增大，燃烧速度下降，燃烧温度下降，**NOX** 降低，但是不完全燃烧加剧使 **CO** 和 **HC** 增大）优化燃烧系统设计（小面容比降低 **HC** 的淬熄效应，改善气流运动促进燃料快速充分燃烧）电控技术，提高点火能量。

后处理：三效催化器 **TWC**、颗粒捕集器 **GPF** 用于缸内直喷汽油机

4. 柴油机内净化与后处理技术：要抑制预混合燃烧（**nox**）促进扩散燃烧（降低 **PM** 和提高热效率）

内净化：推迟喷油时刻（燃烧过程避开上止点但等容度下降，最高燃烧温度下降，**NOX** 降低，喷油时刻接近于上止点，着火落后期时间下降，可燃混合气减少，燃烧初期速率降低，压力升高率降低，**NOX** 降低，但是 **PM** 升高，油耗升高，功率降低）废气再循环（使最高燃烧温度降低，过量空气系数降低，采用冷却 **EGR** 可以挽救一下油耗和 **PM**）增压及增压中冷（增压增大过量空气系数促进 **PM** 燃烧，导致氧气浓度增大降低 **PM CO HC**，但是 **NOX** 也很增大故要增压中冷，使反应温度降下来以降低 **NOX** 的增加）改善喷油过程（早期缓慢，中期急速，后期快断）优化燃烧室设计

后处理：**DOC**、**SCR**、**DPF**，**DOC** 放在 **SCR** 之前用于增加 **NOX** 中 **NO2** 的浓度，达到 **FAST SCR** 提高转化效率；**DOC** 放在 **DPF**

之前，用于生成  $\text{NO}_2$  和热以颗粒捕集器的再生；DOC 放在 SCR 之后，用于氧化富余的  $\text{NH}_3$  氨气。DPF 有断续加热再生，是主动再生，有连续催化再生。

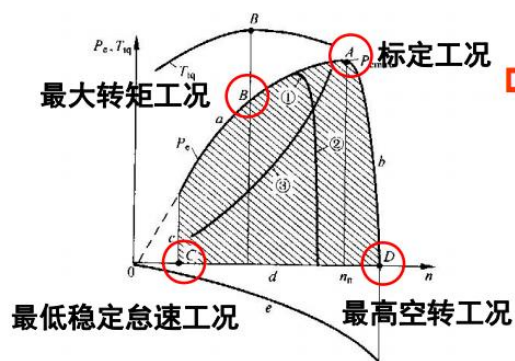
## 第十章：

### 1. 内燃机工况概念、工况平面特征曲线和特征点，功率标定：

#### 主要内容



- |             |  |
|-------------|--|
| 1. 内燃机运行工况  | → 1) 内燃机运行工况 (operating condition): 负荷 $T_{tq}, p_{me}(P_e)$ vs 转速 $n$ |
| 2. 内燃机特性分类  |  |
| 3. 内燃机运行特性  | □ 点工况运行: 抽水机 ①   |
| 4. 内燃机与整车匹配 | □ 线工况运行: 发电机组 ② ; 船舶发动机 ③  |
|             | □ 面工况运行: 汽车; 拖拉机   |



- a — 最大功率限制线
- b — 最高转速限制线
- c — 最低稳定转速限制线
- d — 怠速线
- e — 倒拖线

## 1. 内燃机运行工况 → 2) 内燃机功率标定

### 2. 内燃机特性分类

### 3. 内燃机运行特性

### 4. 内燃机与整车匹配

□ 标定工况：内燃机铭牌上规定的**最大输出功率**及其对应**转速**所确定的工况。

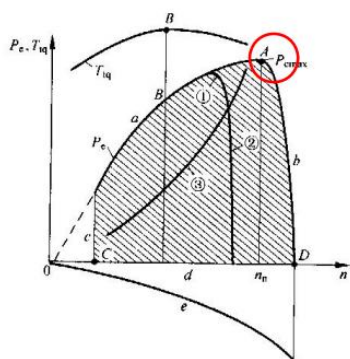
(1) **15分钟功率**：汽车、舰艇、坦克

(2) **1小时功率**：拖拉机、工程机械

(3) **12小时功率**：农业排灌、机车

(4) **持续功率**：远洋船舶、发电

□ 同一台内燃机，标定功率下使用的**时间**越长，标定功率越小。

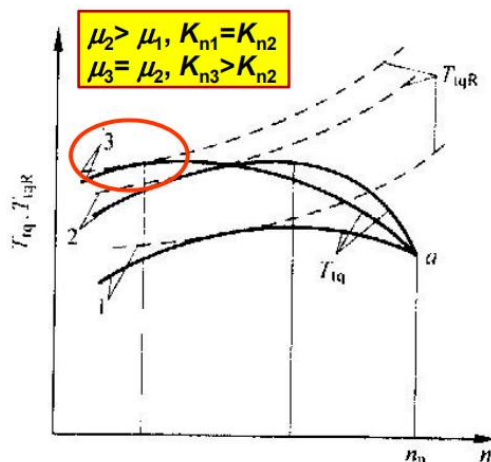


发动机的工况平面、工况线及典型工况点

2. 内燃机特性概念和分类，运行特性概念和分类：按工作特点有稳态特性和动态特性，按可变参数分有调整特性（转速和油量调节位置不变时，内燃机性能指标随调整参数的变化规律）和运行特性（在一定条件下，内燃机性能参数随转速和负荷的变化规律）

3. 汽油机柴油机速度特性、负荷特性，万有特性差异和成因：万有特性是转速和负荷都不变的情况下，性能指标的变化规律。注意外特性曲线是标定工况位置所决定的全负荷速度特性曲线，部分负荷特性曲线是低于标定工况的部分负荷速度特性曲线。





不同  $K_T, K_n$  外特性曲线克服阻力能力的对比

## 1) 转矩适应系数与转矩储备系数

$$K_T = T_{tqmax} / T_{tqn} \quad \text{汽油机: } 1.25 \sim 1.35 \quad \text{柴油机: } < 1.05$$

$$\mu = (T_{tqmax} - T_{tqn}) / T_{tqn} = K_T - 1$$

## 2) 转速适应系数

$$K_n = n_n / n_m \quad \text{汽油机: } 1.6 \sim 2.5 \quad \text{柴油机: } 1.4 \sim 2.0$$

结论:

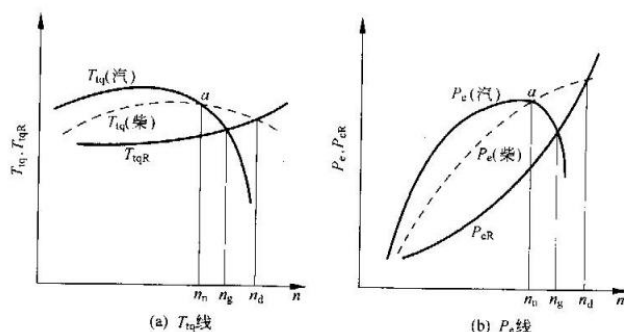
$K_T$  和  $K_n$  越大, 低速扭矩越大, 发动机克服阻力的能力越强

Question: 三条转矩外特性线, 哪一条线的动力适应性最好?

4.

# 柴油机与汽油机外特性的对比

相同标定点条件下, 汽、柴油机动力适应性对比

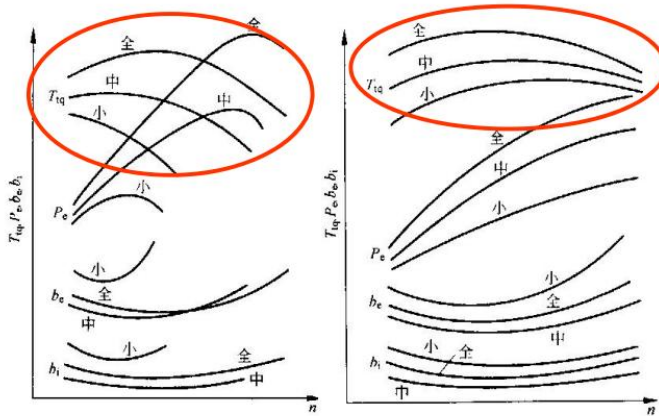


汽、柴油机外特性线与阻力线的稳态平衡关系

- 同一档位, 汽油机加速和克服阻力能力优于柴油机。
- 柴油机最高转速更远偏离标定转速, 容易造成“飞车”。
- 柴油机需低速“校正”、高速“调速”。



## 柴油机与汽油机速度特性的对比

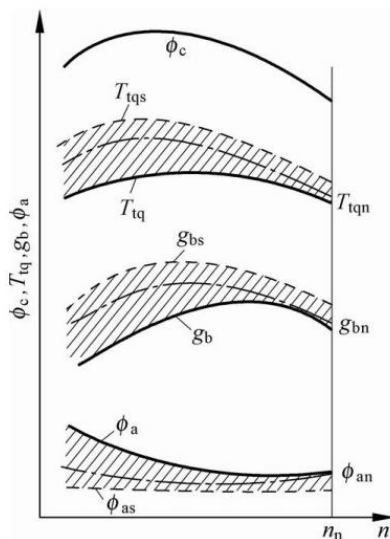


汽油机速度特性

柴油机速度特性

- 汽油机  $T_{tq}$  总体向下倾斜较大，尤其是在低负荷；柴油机  $T_{tq}$  总体变化平坦，低负荷略向上扬 → **动力性、稳定性**
- 汽油机  $P_e$  外特性的最大值往往是标定功率点；柴油机  $P_e$  外特性无此极值点。
- 汽油机  $b_e$  线陡峭些，尤其是低负荷；柴油机  $b_e$  线较平坦。

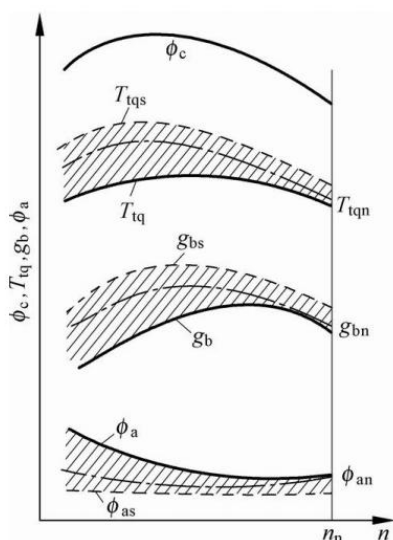
## 柴油机外特性的校正



- 虚线——烟度限制线。
- 剖面线——可以让外特性进行校正而不使烟度超标的空间。
- 校正方法：  
机械校正：加速踏板位置不变，油量调节杆位置随转速下降而自动增大。
- 校正外特性曲线——校正后得到的速度特性已不符合油量调节杆位置不变的定义，故称之为校正外特性曲线。

现代车用电控柴油机一般通过直接控制燃料喷射量对外特性进行校正！

4. 发动机稳定工作原理：汽油机向下倾斜的速度特性曲线具有很好的自我调节能力。而柴油机速度特性曲线变化平坦，柴油机最高转速偏离标定转速，容易“飞车”。



□ 虚线——烟度限制线。

□ 剖面线——可以让外特性进行校正而不使烟度超标的空间。

□ 校正方法：

机械校正：加速踏板位置不变，油量调节杆位置随转速下降而自动增大。

□ 校正外特性曲线——校正后得到的速度特性已不符合油量调节杆位置不变的定义，故称之为校正外特性曲线。

现代车用电控柴油机一般通过直接控制燃料喷射量对外特性进行校正！

5. 内燃机速度特性和整车动力性的关系，内燃机负荷特性与整车燃油经济性的关系：

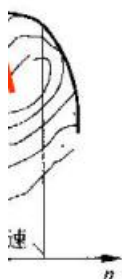
### 3) 改善整车经济性匹配的途径

□ 内燃机：设法使内燃机万有特性低油耗区位于常用排挡、常用车速区

□ 档位：在同一段路和车速条件下尽可能使用高档；档位越多，增加了内燃机处于经济性工作状态的机会，有利于提高整车燃油经济性（如采用CVT）。

□ 行驶车速：接近于中等车速，使用油耗最低。

□ 适用车速 =  $(g_{100}/u)_{\min}$ ：既可节油又可提高生产效率。



## 第十一章：

1. 纯电驱动系统定义，构成，拓扑结构：纯电驱动系统指采用动力电池存储的电直接驱动车辆，包括驱动电机系统和动力电池系统。拓扑结构分为集中式驱动和分布式驱动，后者有轮边电机驱动和轮毂电机驱动两类。

2. 驱动电机系统构成，分类，机械特性和效率：由驱动电机、电机控制器、相关辅助装置组成。驱动电机由磁场相互作用（**induction** 交流感应电机适用于商用车，转速高，成本低，可靠性好），磁路中磁阻的改变（永磁同步电机，适用于乘用车，工作效率高，功率密度大）两类。驱动电机损耗有铜损，铁损，机械损失，杂散损失。电机控制器损失有主电路损失和控制电路损失。

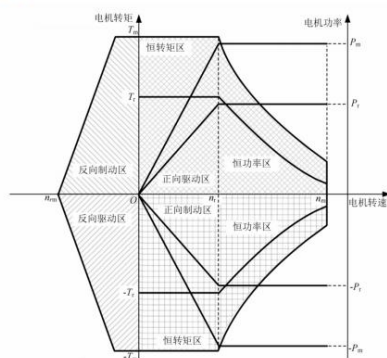
### 主要内容



#### 1. 纯电驱动系统概述

#### 2. 驱动电机系统

#### 3. 动力电池系统



#### 3) 驱动电机系统特性与效率

##### ■ 驱动电机机械特性

电机的转矩-转速关系，也称为电机的外特性。

（1）电机机械特性按象限可以分为四个区域，包括**正向驱动区**、**反向制动区**、**反向驱动区**和**正向制动区**。

（2）在第一、四象限，存在**恒转矩区**和**恒功率区**，两个区域的转速边界即为电机的**基速**，通常也是设计的**额定转速**。

（3） $T_m$ 为电机的**最大转矩**； $T_r$ 为电机的**额定转矩**； $n_m$ 为电机的**正向最高转速**，简称电机的**最高转速**； $n_{rm}$ 为电机的**反向最高转速**； $n_r$ 为电机的**额定转速/基速**； $P_m$ 为电机的**最大功率**； $P_r$ 为电机的**额定功率**。



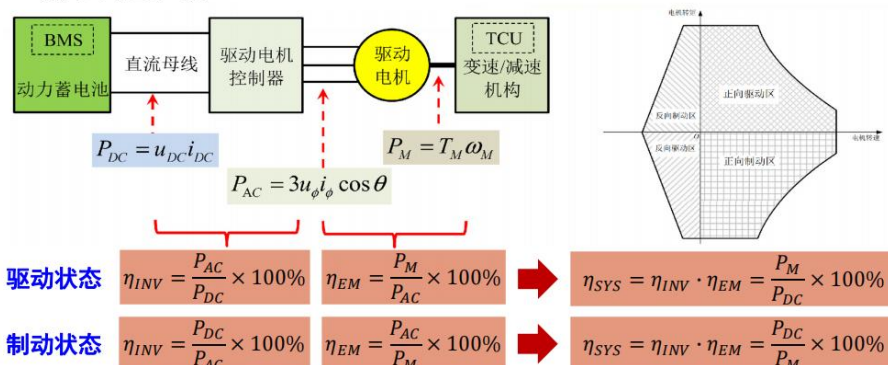
## 1. 纯电驱动系统概述

## 2. 驱动电机系统

## 3. 动力电池系统

## 3) 驱动电机系统特性与效率

## ■ 驱动电机系统效率



## 内燃机 vs 驱动电机

内燃机	驱动电机
化学能→机械能	电能↔机械能
效率低、高效区窄	广域高效
碳排放、污染物排放	终端零排放
单象限工作	四象限工作
维护复杂、成本高	维护简单、成本低
NVH差	NVH好
结构复杂	结构简单
涉及学科：热力学、流体力学、机械学、燃烧学	涉及学科：电磁学、机械学、控制理论、电力电子

3. PMSM 结构和工作原理：分为表贴式永磁同步电机和内置式永磁同步电机。转矩由电磁转矩和磁阻转矩两部分组成，

磁阻转矩  $L_d < L_q$ ，会产生附加的磁阻转矩，能增加转矩密度，过载能力和功率密度，同时转子在贴片内部，转子结构牢靠，能稳定运行。



ZHEJIANG UNIVERSITY

#### 4) 永磁同步电机工作原理

##### ➔ ■ 永磁同步电机矢量控制 (FOC)

(1) 根据电机目标转矩  $T^*$ ，按照选定控制策略计算直轴和交轴电流目标值  $i_d^*$  和  $i_q^*$ ；

(2) 对电机三相定子绕组实际电流  $i_A$ 、 $i_B$  和  $i_C$  进行采样，通过坐标变换得到实际的直轴和交轴电流  $i_d$  和  $i_q$ ；

(3) 基于  $i_d^*$  和  $i_q^*$ ，对  $i_d$  和  $i_q$  进行闭环反馈控制，得到定子绕组目标电压  $u_d^*$  和  $u_q^*$ ；

(4) 根据  $u_d^*$  和  $u_q^*$ ，利用坐标反变换得到静止坐标系下的  $u_\alpha^*$  和  $u_\beta^*$  或  $u_A^*$ 、 $u_B^*$  和  $u_C^*$ ；

(5) 根据  $u_\alpha^*$  和  $u_\beta^*$  或  $u_A^*$ 、 $u_B^*$  和  $u_C^*$ ，控制电机控制器中电力电子器件的通断，实现对  $i_d$  和  $i_q$ 、转矩  $T$  的控制。



4.

5. 锂离子电池基本工作原理：锂离子从正负极间反复脱出或者嵌入。放电时候，电子从负极到正极，锂离子从负极到正极，负极材料-导电体-负极集流体（为正负极材料涂布载体，铝箔）-负极极耳（连接所用）-外电路-正极耳-正极集流体（为正负极材料涂布载体，铜箔）-导电体-正极材料。锂离子：负极颗粒-电解液-隔膜-电解液-正极颗粒。

6. 锂离子电池材料与部件：正负极活性材料，电解液，隔膜（PP/PE/PP 三层复合膜，闭孔温度，隔膜微孔受热闭合阻止离子通过和反应进行，破膜温度使膜被破坏大面积短路）
7. 锂离子电池性能参数：SOC 荷电状态，SOH 健康状态

## 第十二章：

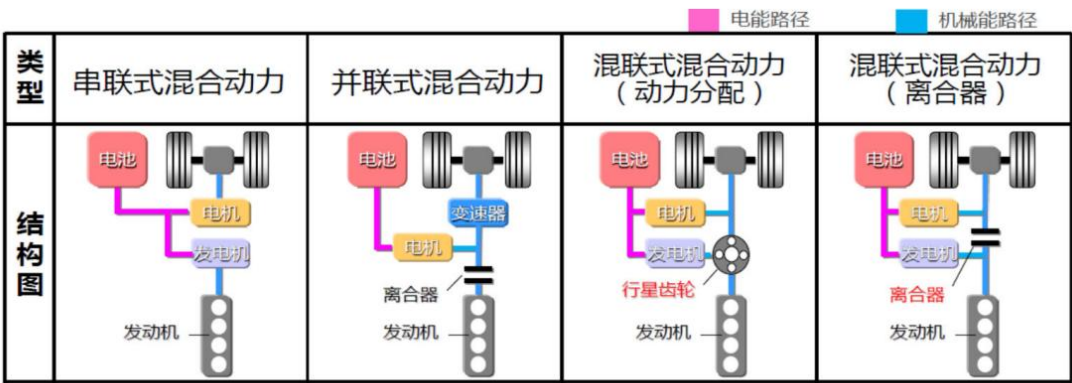
1. 燃料电池概念、分类，质子交换膜燃料电池基本原理：燃料电池是一种把燃料所具有化学能直接转化为电能电化学装置。注意通过电化学反应将化学能转化为电能，整个过程中与外界存在物质交换和能量交换，是一个开放系统。质子交换膜燃料电池工作密度高，工组温度低，容易中毒。氢气在电源阳极，电路负极，氧气在电源阴极，电路正极。
2. 质子交换膜燃料电池电堆主要部件，功能要求：双极板 BP，气体扩散层 GDL，催化层 CL，质子交换膜 PEM，膜电极是（GDL CL PEM 和）
3. 电池电压，效率定义：PEMFC 极化曲线，即伏安特性曲线，是工作电压和电流的关系曲线，有活化极化，浓差极化，欧姆极化。

## 第十三章：

1. 混合动力系统定义，分类，节能原理：由两个或多个动力源单独或同时驱动车辆的动力系统。狭义上采用内燃机和电

机单独或同时驱动车辆的动力系统。混合系统节能原理：可以优化内燃机工作区域，减少怠速工作状态，实现制动能量回收，使用 **Plug-In** 插电。优势主要有：减少怠速工况损耗，使内燃机工作在高效区，减少排放，提高工作效率，可以实现制动能量回收，可以使用 **Plug-In** 插电，也可以加油站加油，无里程忧虑，两套动力系统，动力性更好，采用“浅充浅放”工作状态，有利于提高动力电池寿命，安全性。但是缺点就是有两套动力系统，成本高，结构复杂。

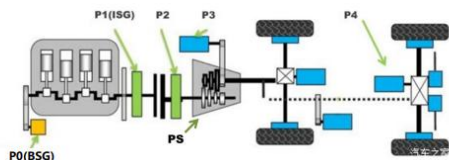
依照动力联结方式分类：



依据电机功率混合比例划分：微、轻（助力）、深、全混合



1. 混合动力系统概述
2. 构型及其工作模式
3. 混动能量管理策略



常见的混动构型：

48V系统（BSG）：P0

集成起动/发电系统（ISG）：P1

丰田THS混动系统：PS

本田i-MMD混动系统：P1+P2

本田i-DCD混动系统：P3

日产e-Power系统：P1+P2

## 2) 混合动力系统分类

### ■ 依据电机布置位置划分：

**P0**：电机位于内燃机前端皮带上，如48V系统的BSG（微混）

**P1**：电机位于内燃机曲轴输出端，如ISG（轻混）

**P2**：电机位于内燃机与变速箱之间、离合器之后（深混）

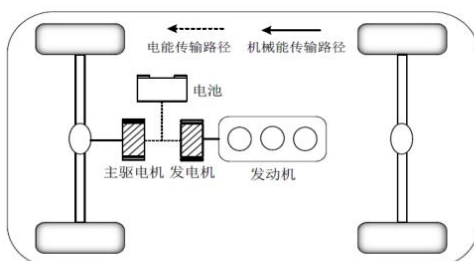
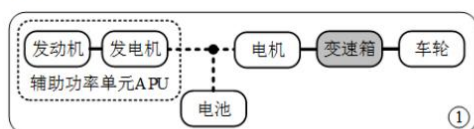
**P3**：电机位于变速箱输出端，与内燃机共享输出（深混）

**P4**：电机与内燃机轴分离，驱动无动力车轮（纯电、全混）

**PS**：功率分流（混联）

2. 混合动力系统构型，不同混动构型特点和工作模式：功率分流式混合动力系统有行星齿轮，两个电机，和发电机，核心是让内燃机工作最万有。特性图上最有效区域，以提高其经济性和动力性

1. 混合动力系统概述
2. 构型及其工作模式
3. 混动能量管理策略



## 1) 串联混合动力系统

### ■ 构型特点

（1）内燃机只带动发电机发电，不直接为车辆提供驱动力，主驱电机单独驱动车辆；

（2）内燃机和发电机构成辅助动力单元（APU或增程器），发出的电能可以直接供给主驱电机驱动车辆，也可以存储在动力电池中。

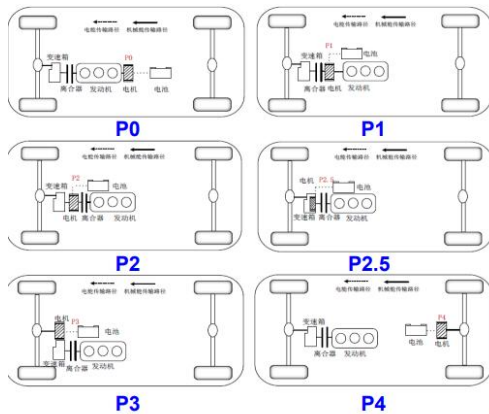
### ■ 构型优缺点

（1）内燃机与车辆行驶工况机械解耦，可始终工作在高效和低排放工况区间；

（2）市区工况节能明显，高速工况因存在多次能量转换效率低；

（3）双电机功率要求比较高，成本较高。

1. 混合动力系统概述
2. 构型及其工作模式
3. 混动能量管理策略



## 2) 并联混合动力系统

### ■ 构型特点

内燃机和电驱动系统通过动力耦合装置与驱动轴连接，可以单独或共同驱动。

### ■ 构型优缺点

- (1) 两套动力源，整车动力性更好；
- (2) 内燃机可以直驱，减少能量转换损失；
- (3) 电驱动系统优化内燃机负荷率，提高整车燃油经济性；
- (4) 与串联构型相比，电机功率需求降低。
- (5) 需要配置离合器、变速器等传动部件，结构复杂，控制难度大；
- (6) 内燃机与车辆工况无法完全解耦。

## 3) 混联混合动力系统

### ■ 比亚迪超级混动DM-i（串并联）

- (1) **纯电模式**：发动机不启动，离合器分离，驱动电机单独驱动；
- (2) **增程模式**：发动机启动带动发电机发电，离合器分离，驱动电机单独驱动；
- (3) **混动模式**：巡航模式（发动机启动，离合器结合驱动车辆，两电机不工作）、巡航发电模式（发动机启动，发电机给电池充电，离合器结合驱动车辆，驱动电机不工作）、加速模式（内燃机启动，离合器结合，两电机和发动机共同驱动车辆）；
- (4) **回收模式**：离合器断开，驱动电机回收车辆动能。

表 1 混合动力系统性能对比

	串联式	并联式	混联式
动力形式	以 <b>电力形式</b> 实现动力 <b>耦合</b>	以 <b>机械形式</b> 实现动力 <b>耦合</b>	<b>两者兼有</b>
结构特点	发动机与电动机不联接，发动机与行驶系统解耦， <b>结构简单</b>	发动机与电动机机械联接， <b>结构复杂</b>	发动机、发电机、电动机通过机械装置进行耦合， <b>结构特别复杂</b>
特殊要求	发电机、电动机效率和 <b>功率要求高</b> ，电池容量要求高	发动机和电动机可以做小，但一般需要 <b>自动变速器和离合器</b>	<b>动力耦合装置要求很高</b> ，需要自动变速器和离合器
制造成本	<b>高</b>	<b>较高</b>	<b>很高</b>
控制策略	以提高系统效率为核心， <b>复杂</b>	以动态协调两套系统工作为核心， <b>复杂</b>	以复杂能量流管理和动态协调为核心， <b>很复杂</b>
系统油耗	频繁启停的 <b>市区工况省油</b>	市郊、城间 <b>高速工况省油</b>	<b>兼顾不同工况</b>
排放水平	ICE运行区域窄， <b>排放好</b>	ICE运行区域较窄， <b>排放较好</b>	ICE运行区域窄， <b>排放好</b>

3. 混合动力系统能量管理策略（规则化，最优化，智能化）：  
预见性，智能性。