

第六章 发动机特性

§ 6-1 发动机工况和性能指标分析式

一 发动机工况

在绪论中我们已经介绍过工况的概念。有效功率 N_e 和转速 n 决定了发动机的工作运行情况。

工况 — N_e , 转速 n 。

发动机的工况分为点工况、线工况和面工况。

二 发动机性能指标分析式

$$1 \quad p_e = k_1 \frac{\eta_v}{\alpha} \eta_i \eta_m$$

$$2 \quad M_e = k_2 \frac{\eta_v}{\alpha} \eta_i \eta_m$$

$$3 \quad N_e = k_3 \frac{\eta_v}{\alpha} \eta_i \eta_m n$$

$$4 \quad g_e = k_4 \frac{1}{\eta_i \eta_m}$$

$$5 \quad G_T = k_5 \frac{\eta_v}{\alpha} n$$

§ 6-2 发动机速度特性

发动机节气门开度（或油门开度）不变，发动机性能指标随转速 n 变化的关系。

如：汽车爬坡或阻力变化时，节气门（或油门）开度不变， n 随外界负荷的变化而变化。外界负荷大， $n \downarrow$ ，外界负荷小， $n \uparrow$ ，这时发动机沿速度特性工作。

一 汽油机的速度特性

（一）定义

汽油机节气门开度固定不变，汽油机性能指标随转速 n 变化的关系。

外特性（全负荷的速度特性）— 节气门全开（100%），测得的速度特性。

部分速度特性 — 节气门固定在部分开启位置，测得的速度特性。

（二）外特性曲线

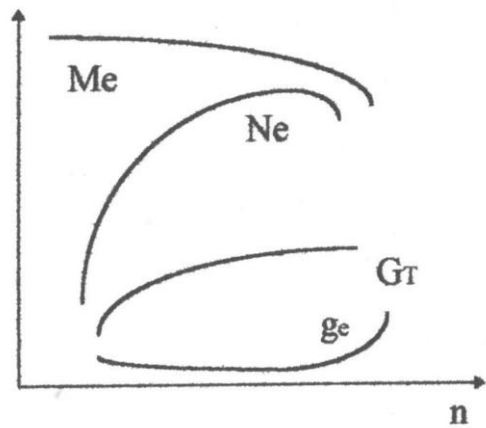
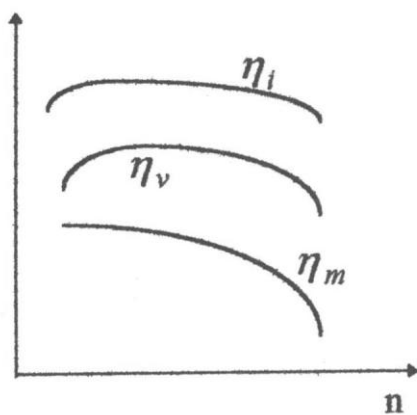
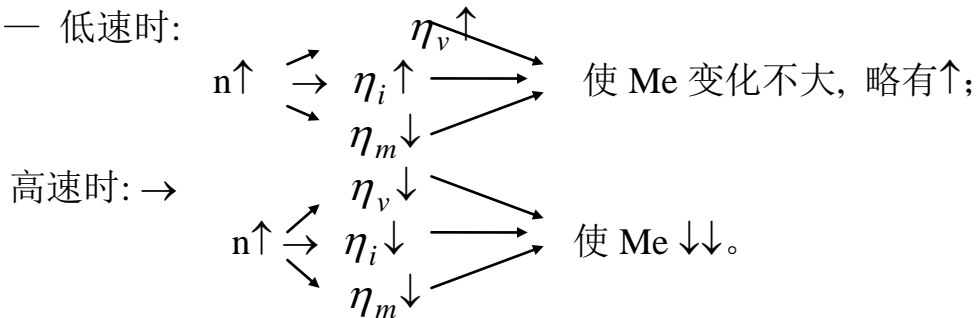
1 M_e 曲线

$$M_e = k_2 \frac{\eta_v}{\alpha} \eta_i \eta_m$$

$n \uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow$ (不多)

$$M_e = k_2 \eta_v \eta_i \eta_m$$

- (1) η_v — $n \uparrow \rightarrow$ 气流惯性 $\uparrow \rightarrow \eta_v \uparrow$; $n \uparrow \uparrow \rightarrow$ 节流损失 $\uparrow \rightarrow \eta_v \downarrow$ 。
- (2) η_i — $n \uparrow \rightarrow$ 气流运动 $\uparrow \rightarrow$ 混合气形成改善 $\rightarrow \eta_i \uparrow$;
 $n \uparrow \uparrow \rightarrow$ 燃烧时间 \downarrow , 燃烧恶化 $\rightarrow \eta_i \downarrow$ 。
- (3) η_m — $n \uparrow \rightarrow \eta_m \downarrow$ 。
- (4) M_e — 低速时:



2 Ne 曲线

低速时: $n \uparrow \rightarrow M_e \uparrow$ (不大), 但 $Ne \propto M_e \uparrow \cdot n \uparrow \rightarrow Ne \uparrow \uparrow$;

高速时: $n \uparrow \rightarrow M_e \downarrow \rightarrow Ne \uparrow$ (不大)。

3 ge 曲线

$$g_e = k_4 \frac{1}{\eta_i \eta_m}$$

低速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_i \uparrow, \eta_m \downarrow, \eta_i \uparrow$ 大于 $\eta_m \downarrow \rightarrow g_e \downarrow$ (不大);

高速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_i \downarrow, \eta_m \downarrow \rightarrow g_e \uparrow \uparrow$ 。

有一个 $g_{e,min}$ 对应的 n , 整个曲线变化不大。

4 GT 曲线

$$G_T = k_5 \frac{\eta_v}{\alpha} n$$

低速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_v \uparrow, n \downarrow \rightarrow G_T \uparrow$ (不大);

高速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_v \downarrow, n \uparrow \uparrow \rightarrow G_T \uparrow \uparrow$ 。

G_T 曲线先缓后陡。

(三) 外特性的意义

1 后备功率

后备功率大, 爬坡、加速性好。

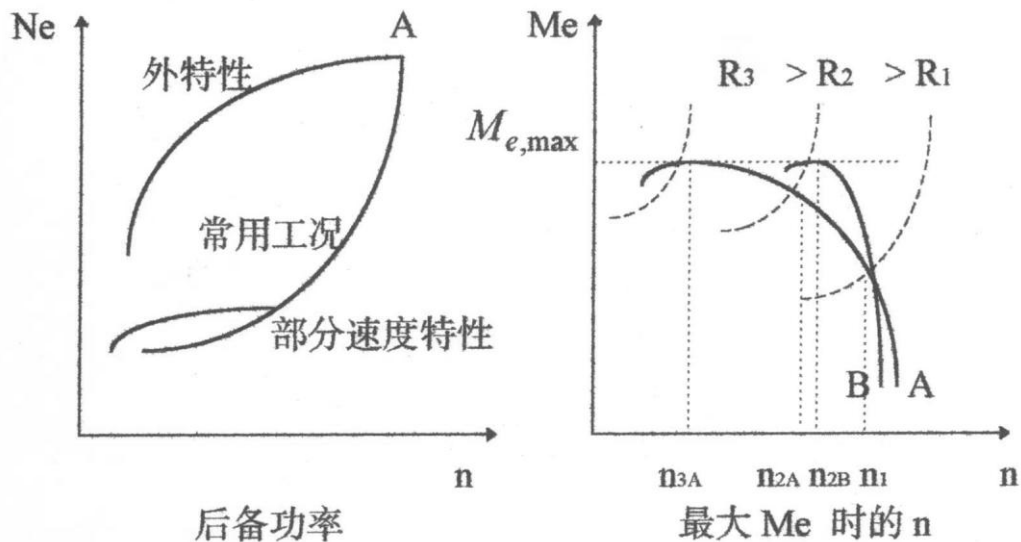
但后备功率过大, 则常用工况在低负荷区, 经济性差。

图中 A 点, 后备功率为零。

2 最大 M_e 时的 n

最大 M_e 时的 n 越低, 克服外界阻力能力越强。

A、B 发动机的 $M_{e,max}$ 相同, 但 A 机 $M_{e,max}$ 所对应的 n 比 B 机低。当外界阻力矩为 R_1 时, A、B 两机均在 n_1 下稳定运转。当外界阻力矩增大至 R_2 时, B 机发出最大扭矩在 n_{2B} 下稳定运转, 此时 A 机则在 n_{2A} 下稳定运转。当外界阻力矩再增大至 R_3 时, A 机发出最大扭矩在 n_{3A} 下稳定运转, 而 B 机无法克服外界阻力矩, 只能熄火。



二 柴油机的速度特性

(一) 定义

油量调节机械 (油门拉杆或齿条) 位置固定不动, 柴油机性能指标随转速 n 变化的关系。

外特性 (全负荷的速度特性) — 油量调节机构固定在标定功率循环油量位置时, 测得的速度特性。

部分速度特性 — 油调节机构固定在小于标定功率循环供油位置时, 测得的速度特性。

(二) 标定功率

对于非增压发动机来说, 最大功率要受到平均有效压力和转速两方面的限制。一台发动机的功率究竟标定多大才适合, 这要根据发动机特性和具体用途、使用特点及寿命和可靠性要求而人为确定, 根据我国情况, 国家标准规定了发

动机标定功率分为下列四级

- 1 15 分钟功率 — 允许发动机连续运转 15 分钟的最大有效功率。
- 2 1 小时功率 — 允许发动机连续运转 1 小时的最大有效功率。
- 3 12 小时功率 — 允许发动机连续运转 12 小时的最高有效功率。
- 4 持续功率 — 允许发动机长期连续运转的最高有效功率。

每台发动机都应按用途在铭牌上标明上述四种功率的两种及相应的转速。

车用 — 常用 15 分钟, 1 小时或 12 小时功率中的两种作为铭牌功率。作为特性实验时, 应把两种标定功率的外特性全做出来。

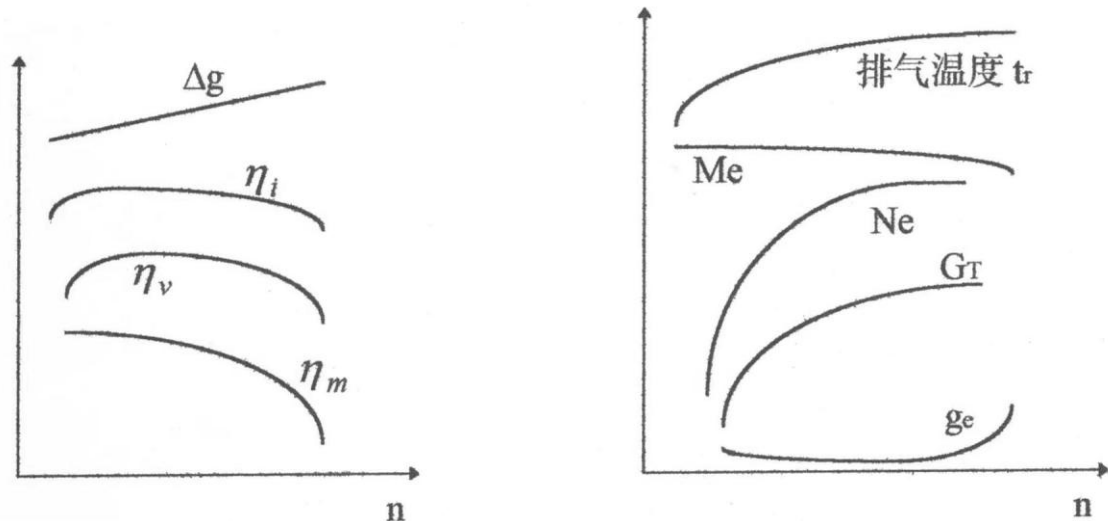
国家规定:

车用柴油机, 除作外特性外, 还应作标定功率的 90%, 75%, 50%, 25% 的部分速度特性实验。

一般柴油机只作外特性就可以了。

时间越短, 功率值应越大。如: 15 分钟功率比 12 小时功率大。

(三) 外特性曲线



1 Me 曲线

$$M_e = k_2 \frac{\eta_v}{\alpha} \eta_i \eta_m$$

- (1) $\eta_v - n \uparrow \rightarrow \eta_v \uparrow; n \uparrow \uparrow \rightarrow \eta_v \downarrow$ 。
- (2) $\Delta g - n \uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow$ (油泵速度特性) 。
- (3) $\alpha - n \uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow, \eta_v \downarrow \rightarrow \alpha \downarrow$ 。
- (4) $\eta_i - n \uparrow \rightarrow \eta_i \uparrow; n \uparrow \uparrow \rightarrow$ 燃烧时间 $\downarrow, \alpha \downarrow \rightarrow \eta_i \downarrow$ 。
- (5) $\eta_m - n \uparrow \rightarrow \eta_m \downarrow$ 。
- (6) $M_e - \eta_i \cdot \eta_m \downarrow, \eta_v \downarrow$ 不如 $\alpha \downarrow$ 快, $\frac{\eta_v \downarrow}{\alpha \downarrow} \uparrow$

$M_e = k_2 \cdot \uparrow \cdot \downarrow \rightarrow$ 使曲线平缓。

2 Ne 曲线

$$N_e \propto M_e \cdot n$$

Me 曲线平缓 — Me 基本是常数，则
 $n \uparrow \rightarrow Ne \uparrow$ — 几乎是成直线关系。

3 g_e 曲线

$$g_e = k_3 \frac{1}{\eta_i \eta_m}$$

低速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_i \uparrow, \eta_m \downarrow \rightarrow g_e \downarrow$ (不大) ;

高速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_i \downarrow, \eta_m \downarrow \rightarrow g_e \uparrow \uparrow$ 。

有一个 $g_{e,\min}$ 对应的 n ，整个曲线变化不大。

4 G_T 曲线

$$G_T = k_5 \frac{\eta_v}{\alpha} n$$

低速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_v \uparrow, \alpha \downarrow \rightarrow G_T \uparrow \uparrow$;

高速时: $n \uparrow \rightarrow \eta_v \downarrow, \alpha \downarrow \rightarrow G_T \uparrow \uparrow$ 。

整个 G_T 曲线较陡。

(四) 扭矩储备系数 μ 和适应性系数 K

$$\mu = \frac{M_{e\max} - M_e}{M_e} \times 100\%$$

$$K = \frac{M_{e\max}}{M_e}$$

$\mu \uparrow, K \uparrow \rightarrow n \downarrow$ 时, $Me \uparrow$ 快 \rightarrow 不换档情况下, 克服短期超载能力强。

§ 6-3 发动机负荷特性

一 汽油机的负荷特性

转速 n 不变, 发动机的经济性指标随负荷变化的关系。

如: 在不换档情况下, 汽车上坡时加大油门, 下坡时关小油门, 而维持发动机转速 n 不变, 这时发动机沿负荷特性工作。

(一) 定义

转速 n 不变, 汽油机的经济性指标随负荷 — 节气门开度变化的关系。

(二) 特性曲线

1 g_e 曲线

$$g_e = k_4 \frac{1}{\eta_i \eta_m}$$

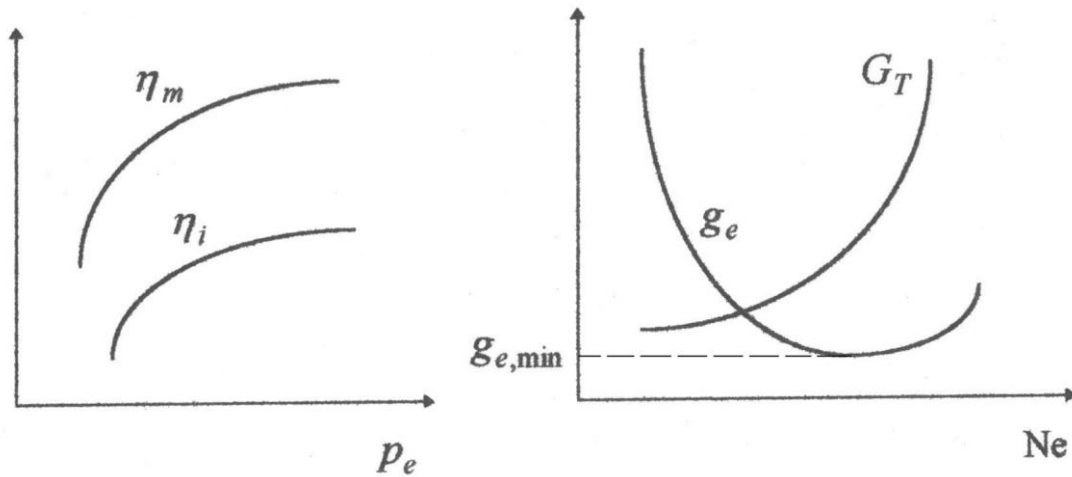
负荷 $\uparrow \rightarrow$ 节气门开度 $\uparrow \rightarrow \eta_m \uparrow, \eta_i \uparrow \rightarrow g_e \downarrow \downarrow$ — 曲线陡。

负荷 $\uparrow\uparrow \rightarrow$ 为发出最大功率 $\alpha < 1$, 燃烧不完全 $\rightarrow g_e \uparrow$ 。

2 G_T 曲线

负荷 $\uparrow \rightarrow G_T \uparrow$

负荷 $\uparrow\uparrow$, 开度 70~80% 时 \rightarrow 化油器中省油器 (或多腔分动化油器的副腔) 开始起作用, 使混合气变浓, $\alpha = 0.8 \sim 0.9 \rightarrow G_T \uparrow\uparrow$ 。

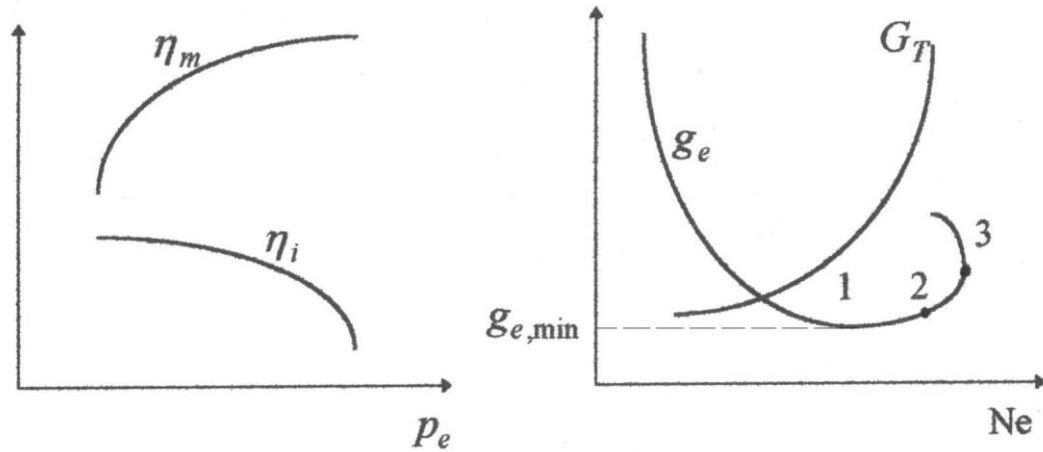


二 柴油机的负荷特性

(一) 定义

转速 n 不变, 柴油机的经济性指标随负荷 — 油门开度变化的关系。

(二) 特性曲线



1 η_i, η_m 曲线

负荷 $\uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow \rightarrow$ 燃烧完全程度 $\downarrow \rightarrow \eta_i \downarrow$ 。

负荷 $\uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow \rightarrow N_i \uparrow, N_m$ 基本不变 $\rightarrow \eta_m = 1 - \frac{N_m}{N_i} \uparrow$ 。

2 g_e 曲线

$$g_e = k_4 \frac{1}{\eta_i \eta_m}$$

负荷 $\uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow \rightarrow \eta_m \uparrow \uparrow, \eta_i \downarrow \rightarrow g_e \downarrow$ 。

负荷 $\uparrow \uparrow \rightarrow \Delta g \uparrow \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow \downarrow \rightarrow$ 燃烧恶化 $\rightarrow \eta_m \uparrow, \eta_i \downarrow \downarrow \rightarrow g_e \uparrow$ 。

若负荷 $\uparrow \uparrow \rightarrow$ 冒黑烟、积炭 \uparrow , 发动机过热, 故障 \uparrow , 寿命 \downarrow 。

3 g_e 曲线上的特征点

1 点 — $g_{e\min}$ 。

2 点 — 排黑烟, 冒烟界限点。

标定功率的选择:

车用柴油机 — 一定在冒烟界限处, 即 2 点。

拖拉机柴油机 — 一定在冒烟界限 2 点以内。

3 点 — $N_{e\max}$ 点。

过 3 点 — $G_T \uparrow \uparrow, g_e \uparrow \uparrow \rightarrow N_e \downarrow$ 。

选择气道、燃烧室结构, 调整燃料供给系统, 常以负荷特性作为标准。

三 汽油机与柴油机负荷特性曲线分析

1 同一 n 下:

(1) $g_{e,\min} \downarrow \rightarrow$ 经济性好。

(2) 曲线平缓 — 负荷变化较广时, 能保持较好的经济性。

柴油机比汽油机 $g_{e,\min}$ 低, 且曲线平缓。

所以, 柴油机的经济性比汽油机的好。

2 从负荷特性曲线可知, 小负荷时, $g_e \uparrow$ 。

所以, 在功力性满足的前提下, 不宜装功率过大的发动机, 以求 $g_e \downarrow$ — 避免大马拉小车。

3 全面评价经济性, 应作出不同 n 下的许多负荷特性曲线 — 万有特性曲线。

§ 6-4 发动机万有特性

一 特性曲线

外特性曲线 — A—B—C—D。

A: 调速手柄最大位置, 外界阻力矩 $R = 0$, 最高空转转速点。

B: 发动机标定功率点, Δg_{\max} 。

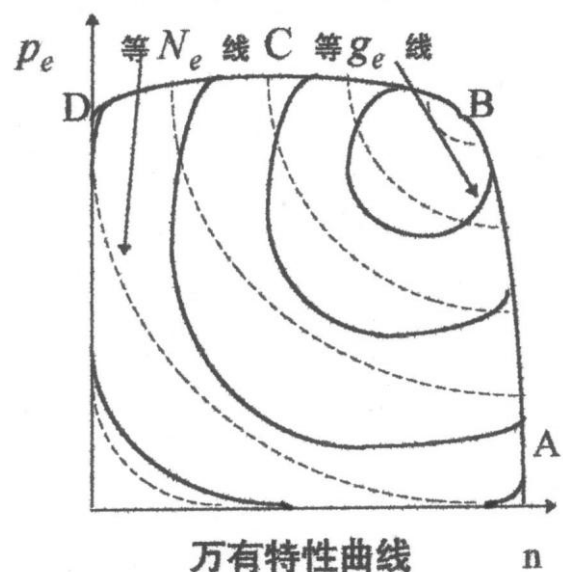
C: 最大 p_e 或 M_e 点, 由此可得扭矩储备系数 μ 和适应性系数 K 。

D: 外特性上最低稳定转速点。

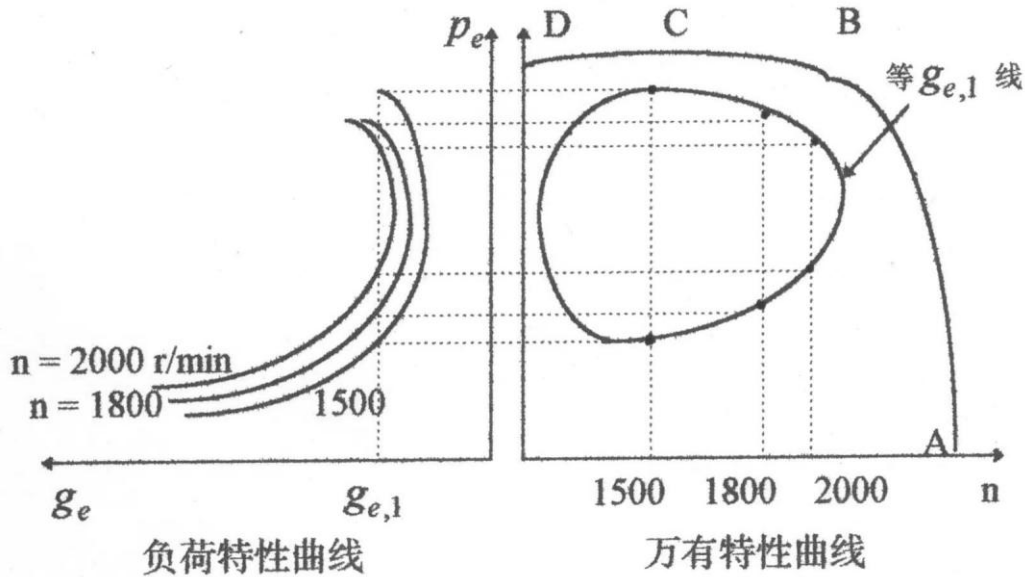
最低空转点 — 怠速点, 图中未标出。

二 曲线的制取

(一) 等 g_e 曲线 — 作图法



- 1 在 p_e-n 图上画出 A-B-C-D 外特性曲线 — 等 g_e 曲线不能超出此范围。
- 2 p_e-n 图上的 p_e 纵坐标与 g_e-p_e 图上的 p_e 纵坐标比例尺必须相同。



- 3 在 g_e-p_e 图上做出数条负荷特性曲线，做 $g_{e,1}$ 直线 — 等 g_e 曲线与这些负荷特性曲线相切、相交于一点或两点。从相切、相交点引平行线至 p_e-n 图。从 p_e-n 图上的相应 n 点引垂直线与平行线相交。用光滑曲线连接 p_e-n 图上的这些交点，即为万有特性曲线的等 $g_{e,1}$ 曲线。

(二) 等 N_e 曲线 — 解析法

$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{302} \times 10^{-3} = k p_e \cdot n$$

$$p_e = \frac{N_e}{k n}$$

取一个 N_e 值，可以做出一条 $p_e = f(n)$ 曲线 — 等 N_e 曲线，再取一个 N_e 值，又可以做出一条等 N_e 曲线… 等 N_e 曲线为一组双曲线。

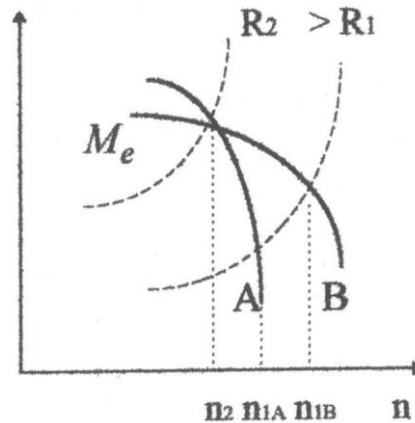
三 分析

- 1 最内层的等 g_e 曲线相当于最经济的区域。曲线越向外， g_e 越大。
- 2 若曲线沿横向较长，则说明在负荷变化不大，而 n 变化较大的范围内， g_e 变化较小。
适于车用，其最经济区大约在万有特性曲线的中间偏上位置。
若曲线沿纵向较长，则说明在 n 变化不大，而负荷变化较大的范围内， g_e 变化较小。
适于拖拉机用，其最经济区大约在万有特性曲线的上部。
- 3 若万有特性不能满足使用要求，则需调机或重新选机。

§ 6-5 发动机调速特性

一 装调速器的必要性

为防止高速飞车和低速熄火。



二 全程式调速器

在整个发动机工作范围内，调整扭矩特性。

(一) 工作原理

调速飞球在推力盘上的导向槽中滚动，两球始终相触，右边推力盘没有左右向移动，只有转动。共有 12 个飞球，一边 6 个，一共 3 付。

1 当发动机在某一转速 n 下运行时，飞球受离心力作用，对推力盘有一正压力，水平方向分力与弹簧力相平衡，油门拉杆固定在推力盘 5 上，转速就稳定在这种状态下。

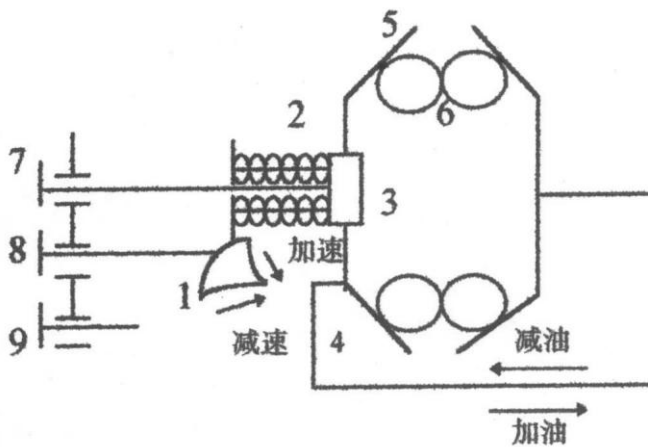
$n \uparrow \rightarrow$ 小球受离心力作用加大，对推力盘的正压力加大当外界负荷 $\downarrow \rightarrow$ 使推力盘 5 带动油门拉杆向左移动 \rightarrow 供油量 $\Delta g \downarrow$ ，转速就稳定在这一新的状态下。

$n \downarrow \rightarrow$ 供油量 $\Delta g \uparrow$ 。

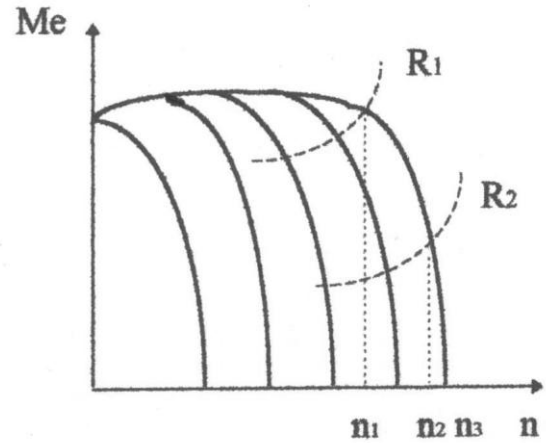
2 调速手柄 1 调整弹簧 2 的预紧力 \rightarrow 弹簧力平衡点变化 \rightarrow 调速器起作用的转速值改变。一定的预紧力对应于一定的转速范围。因此，在整个发动机工作范

围内，均可调整扭矩特性。

调速手柄受到怠速螺钉 8 和限速螺钉 9 的限制，也就限制了柴油机的最高和最低稳定转速。



全程式调速器



全程式调速器调速特性曲线

- 1.调速手柄 2.调速弹簧 3.固定螺母 4.油量调节拉杆 5.推力盘 6.调速飞球
7.油调节螺钉 8.怠速螺钉 9.限制螺钉

(二) 特性曲线

n_1 — R_1 大, M_{e1} , Δg_{\max}

n_2 — R_2 小, M_{e2} , Δg

n_3 — $R_3=0$, $M_{e,3}=0$, Δg_{\min}

μ 、 K 调速较大, 多用于拖拉机上。

三 两极式调速器

为防止高速飞车和低速熄火。

(一) 工作原理

1 控制怠速转速, $n \downarrow \rightarrow \Delta g \uparrow$, 不致过低而造成熄火。

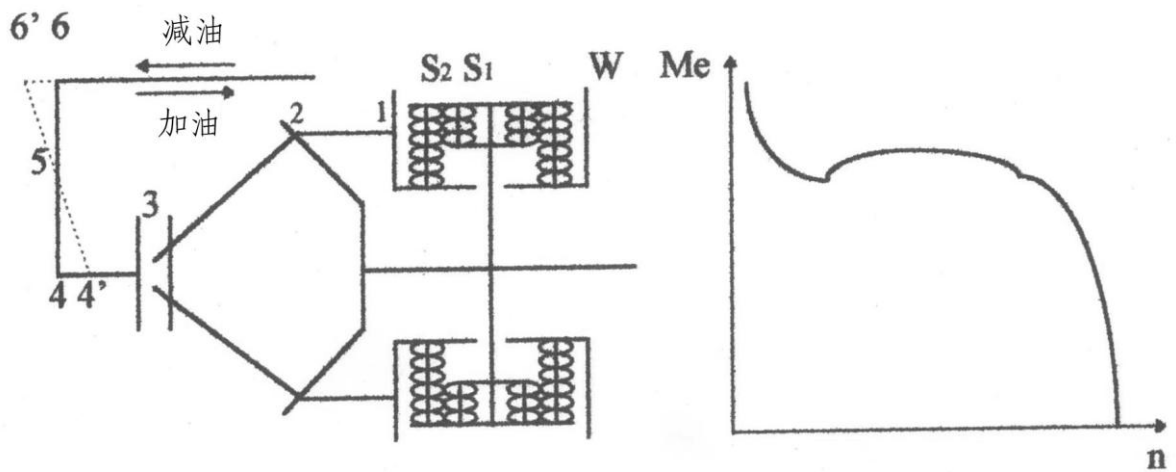
$n \downarrow \rightarrow$ 受软弹簧 S_1 作用, W 下行 \rightarrow 带动 1 点下行 \rightarrow 2 为支点, 由杠杆原理 3 点左移 \rightarrow 4 点左移, 由 4' 点 \rightarrow 4 点 \rightarrow 5 为支点, 6 点右移 \rightarrow 由 6' 点 \rightarrow 6 点 $\rightarrow \Delta g \uparrow \rightarrow n$ 回升, 不致熄火。

$n \uparrow \rightarrow W$ 上行, 当 W 接触到硬弹簧 S_2 后, 由于 S_2 力大, 使 W 停止上行, Δg 不再 \downarrow , \rightarrow 调速器失去作用, 发动机按外特性稳定运转。

2 限制飞车, $n \uparrow \rightarrow \Delta g \downarrow$, 不致过高而造成飞车。

$n \uparrow \uparrow \rightarrow$ 离心力大于 S_1 和 S_2 联合预紧力, $W \uparrow \rightarrow$ 带动 1 点上行 \rightarrow 3 点右行 \rightarrow 4 点右行 \rightarrow 6 点左行 $\rightarrow \Delta g \downarrow \rightarrow n$ 回降, 不致飞车。

5 点的左右移动取决于发动机的负荷, 负荷 $\uparrow \rightarrow$ 5 点右移。



两极式调速器

两极式调速器调速特性曲线

W. 飞块 S₂. 软弹簧 S₁. 硬弹簧

(二) 特性曲线

Me 曲线头段和末段调速器起作用曲线的作用点取决于弹簧 S₁ 和 S₂ 的预紧力，调速器本身不用换档。因此，中段曲线为柴油机的外特性曲线。

四 调速器的工作指标

(一) 调速率 δ

1 稳定调速率 δ_1

$$\delta_1 = \frac{n_2 - n_1}{n}$$

n_1 — 突变前发动机的稳定转速；

n_2 — 突变后发动机的稳定转速；

n — 发动机的标定转速。

反应 Me 曲线陡缓程度。

δ_1 小 \rightarrow Me 曲线陡 \rightarrow 转速回复到稳定点的能力强。

规定：农灌及工程机械 要求： $\delta_1 < 8\%$

汽车、拖拉机 $\delta_1 \leq 10\%$

发电机 $\delta_1 < 5\%$

2 瞬时速调率 δ_2

$$\delta_2 = \frac{n_3 - n_1}{n}$$

n_1 — 外界阻力突变前发动机的稳定转速；

n_3 — 外界阻力突变时发动机的最大或最小瞬时转速；

n — 发动机的标定转速。

表示 n 波动的大小

δ_2 大 \rightarrow 转速波动大, 易游车。

一般 $\delta_2 \leq 10 \sim 12\%$; 发电机 $\delta_2 < 5\%$

(二) 不灵敏度 ε

$$\varepsilon = \frac{n_2' - n_1'}{n}$$

n_1' — 负荷 \uparrow 时, 调速器开始起作用的转速;

n_2' — 负荷 \downarrow 时, 调速器开始起作用的转速;

n — 平均转速。

$$\varepsilon = \frac{R}{E}$$

E — 推力盘上的推力; R — 推力盘上的摩擦力。

ε 取决于摩擦力。

$\varepsilon \uparrow \rightarrow$ 转速稳定性差; $\varepsilon \uparrow \uparrow \rightarrow$ 调速器失灵, 易飞车。

$n \downarrow \rightarrow \varepsilon \uparrow$

一般: $\varepsilon \leq 1.2 \sim 2\%$; 转速低时, $\varepsilon \leq 10 \sim 13\%$ 。

§ 6-6 大气修正

大气温度 $t \uparrow$
 大气压力 $p \downarrow$ \rightarrow 吸入气缸内干空气量 $\downarrow \rightarrow N_e \downarrow, g_e \uparrow$

我国标准: $t = 25 [^\circ\text{C}]$; $p = 100 [\text{kPa}]$; $p_w = 1 [\text{kPa}]$ 。其中 p_w — 该地饱和蒸汽压力。

换算方法:

功率校正系数是用来求得发动机在 C5.2 条规定的标准大气状态下的功率。

$$N_{e,0} = a \cdot N_e$$

式中 $N_{e,0}$ —— 校正功率 (即标准大气状态下的功率);

a —— 校正系数;

N_e —— 实测功率 (试验功率)。

试验大气状态:

- (1) 温度：点燃式发动机：288 K≤T≤308 K；柴油机：283 K≤T≤313 K
 (2) 气压：80kPa≤ps≤110 kPa

一、自然吸气式或增压点燃式发动机校正系数 a_a

$$a_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{1.2} \left(\frac{T}{298}\right)^{0.62}$$

式中： $p_s = p - p_w$ —— 试验时干空气压； T——试验时进气温度， [K]。

试验室应满足的条件： $0.93 < a_a < 1.07$

若超过此限值，在试验报告中应给出所得到的校正系数值，并精确地说明试验状态（温度和压力）。

二、柴油机的校正系数 a_d

$$a_d = \int a^{\int d}$$

式中： $\int a$ —— 大气因子； $\int m$ —— 每种发动机型式和调整的特性参数。

（一）大气因子 $\int a$

此因子指出环境状况（压力、温度和湿度）对发动机吸入空气的影响。大气因子公式随发动机型式不同而不同。

1 自然吸气和机械增压发动机：

$$\int a = \left(\frac{99}{p_s}\right) \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0.7}$$

2 装或不装进气中冷的涡轮增压式发动机：

$$\int a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0.7} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{1.5}$$

（二）发动机因子 $\int m$

$$\int m = 0.036q_c - 1.4$$

式中： $q_c = q/r$ —— 校正的比排量循环供油量； q —— 比排量循环供油量，[mg/L .cycle]； r —— 压缩机出口与压缩机进口的压力比（对于自然吸气式发动机 $r = 1$ ）；

q_c 值在 40~65[mg/L .cycle]之间时，此公式有效；在 q_c 值低于 40 [mg/L .cycle] 时， $\int m$ 可取恒定值 0.3；在 q_c 值高于 65 [mg/L .cycle] 时， $\int m$ 可取恒定值 1.2。

试验室应满足的条件： $0.9 < a_d < 1.1$

若超过此限值，在试验报告中应给出所得校正系数值，并精确地说明试验状态（温度和压力）。