

拖拉机理論及試驗

(第一冊)

华南农学院

农机系拖拉机教研组编

一九七七年十月

拖拉机理论与试验

目 录

	概 述	2
第 一 篇	拖拉机发动机理论基础及试验	2
第 一 章	拖拉机发动机的性能特点	2
第 二 章	柴油机主要技术指标	4
§2-1	柴油机动力指标	5
	一、功 率 二、转 速 三、扭 矩	
§2-2	柴油机经济指标	10
	一、燃油消耗量及燃油消耗率	
	二、机油消耗量及机油消耗率	
§2-3	柴油机有效效率	12
第 三 章	柴油机工作过程分析	13
§3-1	柴油机工作循环示功图	13
§3-2	四行程柴油机的换气过程	17
	一、充气预数	
	二、换气过程与配气相关系	
	三、改善换气效果的措施	
§3-3	四行程柴油机的压缩过程	23
	一、压 缩 比	
	二、压缩终点温度	

	三、使用修理中有关压缩比问题	
§ 3-4	柴油机燃烧过程问题	27
	一、柴油的燃烧性能及燃烧所需空气量	
	二、柴油机燃烧过程的四个时期	
	三、影响柴油机燃烧过程的主要因素	
§ 3-5	柴油机膨胀过程	45
第四章	发动机试验	46
§ 4-1	发动机试验设备和仪器	49
	一、测功器	
	(一) 水力测功器	
	(二) 电力测功器	
	(三) 动力输出轴测功器	
	(四) 测功器的校正	
	二、转速测量仪器	
	三、测量燃油消耗量的设备	
	四、温度测量仪器	
	五、测量压力的仪器	
§ 4-2	发动机试验前准备、试验方法和安全规则	72
§ 4-3	发动机调速特性试验、怠速试验、机油消耗量试验	75
§ 4-4	发动机试验数据的整理	82
第五章	柴油机特性	91
§ 5-1	柴油机负荷特性	92
§ 5-2	柴油机调速特性	94
	一、柴油机调速特性分析	
	二、常用拖拉机柴油机调速特性	

三、柴油机调速特性的正确运用

§5-3 柴油机扭矩储备预数，调速器的稳定
调速率 ————— 104

§5-4 柴油机速度特性 ————— 108

拖拉机理论与实验

概 述

“认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须回到实践去。”

人们在从事拖拉机使用、制造、设计等生产实践和科学试验中，观察到各种现象，积累了很多经验、数据和资料，提高为理性认识；理性认识系统化以后，逐步发展成为拖拉机理论；将这些理论应用于拖拉机使用和生产实践，于是促进拖拉机生产技术发展。

《拖拉机理论与试验》作为农业机械化专业的一门课程，目的在使学生获得拖拉机及发动机基本性能变化规律的理论知识，以便在将来工作中正确地使用、维护、管理、试验和改进拖拉机，并在农业机械化生产实践及科学实验中发挥作用。

本课程包括《发动机理论及试验》及《拖拉机（整机）理论及试验》两大部分，从理论方面配合《拖拉机构造与维修》课程，使学生能得到一定的构造、维修及理论知识。

但是，由于农业拖拉机使用历史还短，拖拉机理论终究是一门年轻的科学，一些本质的规律性理论还未深透揭露，试验资料数据的积累也有限，有待继续进一步深化，并且只能按我们的水平去阐述，一定还有不少错误和缺点，欢迎批评指正。

第一篇

拖拉机发动机理论及试验

第一章

拖拉发动机性能特点的性 能 特 点

为了保证拖拉机在农业生产和繁重的田间作业有效地工作，发动机必须能长时间满负载地运转，能克服不稳定载荷，并能在大负载状况下起步而不致熄火。

我国生产的拖拉机普遍采用柴油机作为发动机，这主要是因为柴油机效率高，而柴油又是石油提炼过程中含量较多的品种，价格较便宜，运输、储存比较安全，比较适合农村使用的缘故。

柴油机是以柴油为燃料，使柴油在汽缸内燃烧，将柴油的热能转变为机械能并产生动力的机器。作为动力装置，柴油机可以装在拖拉机上，也可以装在汽车、火车、轮船，还可用作固定作业（例如发电、抽水等作业）。作为拖拉机动力装置的柴油机构造上的特点是装有灵敏的全程调速和转动惯量很大的飞轮，并具有以下性能特点。

一、能长时间满负载工作

拖拉机工作时，平均负载接近满负载，满负载运转时间较长，以发挥拖拉机的效能，提高生产率。例如在旱地作业时，一般都根据土壤比阻和指定耕深尽量增加耕幅，使拖拉机保持在大油门，满载状况下以合适的较高速度作业；在水田，也常在大油门满载状况下作业；满负载连续作业的时间每天达10多小时；要

求结构可靠耐用。国家规定：允许连续运转 1 小时（或 12 小时）的最大功率，可作为拖拉机（机车、电站、排灌用）的发电机标定功率。

汽车用发动机则经常在较低负载状况工作，仅在上坡或加速等情况下，才短时间满载，因此，要求结构轻巧，能短时超载而加速性能良好。国家规定，允许连续运转 15 分钟的最大有效功率，可作为汽车发动机标定功率。

例如 490 型柴油机，用于汽车并按 15 分钟标定功率称达 50 马力（2500 转/分）；但用于一般负载拖拉机按 1 小时标定功率称为 40 马力（2000 转/分）；用于长时重负载拖拉机或用于发电、排灌的固定动力而按 12 小时标定功率称便只有 30 马力（1500 转/分）。

二、能克服不稳定载荷

由于拖拉机在耕、耙等作业的阻力变化范围较大，拖拉机行走部分推进力和滚动阻力也明显地受到土壤性质变化的影响，因此，发动机的负载也在较大范围内变化。柴油机必须能够适应并克服这种不稳定载荷，保证按稳定的转速和作业速度。

拖拉机用的柴油机一般都装有全程调速器，以提高它的克服不稳定载荷能力，并保证在柴油机额定转速与怠转转速范围内，维持驾驶员所选定的任何转速。这样，可改善驾驶员操纵条件，无需经常变动油门或换挡；提高生产率和经济性能，保证机车稳定而正常地作业。汽车用柴油机一般不装调速器，或只装最高空转限速器，由驾驶员按载荷变化操纵转速。

此外，拖拉机用柴油机的飞轮的转动惯量一般较大，用以克服作业时的不稳定载荷。拖拉机用柴油机飞轮的转动惯量是汽车发动机的 5~10 倍，如果飞轮半径相同的话，则重量相应大 5~10 倍；或者说，35~40 马力的拖拉机柴油机的飞轮转动惯量便相当于 100 马力以上的汽车柴油机的飞轮转动惯量。

三、能大负载起步

为了适应田间作业（例如耕地、耙地），拖拉机应能在大负载情况下起步而不致熄火，有时则要求在高档起步不致熄火，这对柴油机来说是一个特别要求。汽车起步时一般用低档，起步以后逐步换高档，并且起步过程中可以同时加大油门以配合，这是和拖拉机不相同的。

为了使拖拉机具有大负载起步或高档起步能力，必须使柴油机飞轮储备足够能量，按这样要求去设计柴油机飞轮，其转动惯量是相当大的。这样可使拖拉机具有较好的克服不稳定载荷能力。此外，它还可以使柴油机具有较好的转速均匀度，使拖拉机能满足脱谷或发电等作业的高度均匀转速要求。

此外，使用高灵敏度的调速器来控制柴油机的供油量，以改变和调节柴油机从空载到满载所必需的供油量，以稳定转速。目前拖拉机用柴油机安装的离心式（或气力式）全程调速器都具有较高的灵敏度，它和转动惯量较大的飞轮相配合，便能满足拖拉机作业时大负载起步的要求。

第二章

发动机的主要技术指标

拖拉机的性能首先决定于它的发动机的工作性能，还决定于整机结构配置，底盘如传动部分及行走部分的性能和效率。

拖拉机发动机的性能对整个拖拉机的性能有直接影响。良好的发动机动力经济性能是良好的拖拉机动力经济性能的基础；如果发动机动力性能不好（例如功率不足、转速或扭矩不足），就不能指望拖拉机有良好的动力性能（例如足够的牵引功率、牵

引力和速度)；如果发动机经济性能不好(如燃油、机油消耗量大)，必然导致拖拉机经济性能变坏；如果发动机调速性能不好，拖拉机便无法稳定工作；如果发动机扭矩储备不足，拖拉机克服过载能力必然差。因此，制造、修理或使用拖拉机时必须首先使发动机的动力经济性能符合规定的指标，以保证拖拉机具有良好的指标并正常作业。

作为拖拉机动力装置的柴油机，它的工作性能大致可以从四方面：动力性、经济性、可靠性和耐久性。动力性表示一定尺寸和重量的柴油机的作功能力；经济性表示柴油机消耗燃料和润滑油的程度；可靠性和耐久性表示柴油机长时间而无故障地工作的能力，主要决定于柴油机零部件结构、材料和制造工艺等因素。

下面主要介绍柴油机动力性能指标和经济性能指标。这些指标是评价、比较各种柴油机的工作能力所必需，是改进和设计的依据，也是正确使用柴油机所应该掌握的。

柴油机动力经济指标有两种：以工质对活塞作功为基础，经过一系列的抽象和理论分析得出来的指标称为指示指标；以柴油机曲轴输出功率为基础的指标称为有效指标。从使用维修观点考虑，下面主要介绍有效指标，因有效指标可以用功率测量设备实测出来，已基本上体现柴油机动力经济性能。至于指示指标，则在后面一些章节按需要作必要介绍。

§2—1 柴油机动力指标

柴油机的主要动力指标是它的功率、转速和扭矩，现分别说明如下：

一. 功率

柴油机功率表示一台柴油机在单位时间内所作的功，通常以马力(HP)为单位。每秒作功 75 公斤·米为 1 马力。

柴油机有效功率(N_e)表示它的曲轴(或飞轮)所能输出的实际功率。柴油机有效功率是由混合气体在气缸内燃烧形成气

压并推动活塞、连杆、曲轴和飞轮产生出来的。四行程柴油机有效功率受它的气缸直径(d)、行程(S)、缸数(i)、平均有效气压(P_e)和转速(n)所影响，并通过下式计算：

$$N_e = P_e \times \frac{\pi d^2}{4} \times S \times \frac{n}{2 \times 60} \times i \times \frac{1}{75}$$

$$N_e = \frac{P_e \pi d^2 S n i}{36000} \quad (2-1)$$

式中：

P_e —— 平均有效气压 (公斤/厘米²)

d —— 气缸直径 (厘米)

S —— 活塞行程 (米)

n —— 柴油机曲轴额定转速 (转/分)

i —— 气缸数

例如，490 柴油机气缸直径 d 是 90 毫米 (9 厘米)，行程 S 是 100 毫米 (0.1 米)，平均有效气压 P_e 是 7.07 公斤/厘米²，转速 n 是 2000 转/分，缸数 i 是 4，可以计算它的有效功率 N_e 。

$$N_e = \frac{P_e \pi d^2 S n i}{36000} = \frac{7.07 \times 3.1416 \times 9^2 \times 0.1 \times 2000 \times 4}{36000}$$

$$= \frac{14385600}{36000} = 39.96 \text{ 马力}$$

$$= 40 \text{ 马力}$$

如将 (2-1) 式的气缸直径、活塞行程改作气缸排量 V_h ，则 (2-1) 式可变为：

$$N_e = \frac{P_e V_h n i}{2250} \quad (2-1a)$$

式中：

V_h —— 气缸排量 (升)

$$V_h = \frac{\pi d^2}{4} \times S \times 10$$

τ —— 每循环行程数，四行程柴油机 $\tau = 4$ ，二行程柴油机 $\tau = 2$

(2—1a) 式表示柴油机有效功率和气缸排量及其他参数的关系式，可用于四行程循环柴油机或二行程循环柴油机。

柴油机由制造厂制成后，出厂时在柴油机铭牌上标注有标定功率。

按我国国家标准，内燃机技术条件 GB 1147-74 规定，标定功率分为以下四种：

1. 15 分钟功率：

为柴油机允许连续运转 15 分钟的最大有效功率，适用于需要有短时良好超负荷和加速性能的汽车和其他动力设备。

2. 1 小时功率：

为柴油机允许连续运转 1 小时的最大有效功率，适用于克服突加负荷的轮式拖拉机、机车、船舶。

3. 12 小时功率：

为柴油机允许连续运转 12 小时的最大有效功率，适用于经常满负荷的拖拉机、机车、工程机械、农业排灌或电站。

4. 持续功率：

为柴油机允许长期连续运转的最大有效功率，适用于长期持续运转的农业排灌、电站或船舶。

这实质上是根据柴油机的用途、持续使用时间的长短以及使用寿命来标定它的有效功率。拖拉机柴油机一般以 1 小时功率（或 12 小时功率）作为标定功率。

标定功率以往常写作额定功率。

柴油机平均有效气压 P_e 是指气缸内推动活塞做功的实际气体压力（已除去各种损失），它是评价柴油机技术水平和动力性能一个重要指标。目前，我国使用的一般拖拉机柴油机的平均有效气压是 5~7.5 公斤/厘米²，这数值可在柴油机技术参数中查到。表 1—1 列出常用柴油机的平均有效气压 P_e 有效功率，转速以及其他尺寸数值，以供参考。应注意，不同型号的柴油机，平均有效气压是不相同的。同一型号的柴油机， P_e 值随气

缸、活塞、活塞环、气门、喷油泵和喷油器等的工作状态和磨损状况而不相同。

表 2—1 拖拉机柴油机的主要动力指标值

机 车 型 号	红 旗 100	东 方 75	东 方 54	东 方 40	铁 牛 55	铁 牛 60	红 卫 40	丰 收 35	丰 收 27	东 方 30	东 方 28	东 方 20	工 农 12	东 风 11	二 农 10	二 农 3
柴 油 机 型 号	A1461	A125A	A125A	A90	A115T	A1100	A90	A85	A81	A90	A125	A90	A95	A125	A90	A95
平均有效气压 P_e (公斤/厘米 ²)	6.35	6.04	5.02	6.43	6.13	6.88	7.07	7.33	5.8	6.43	5.87	6.43	7.15	7.15	6.43	6.52
转 速 n (转/分)	1050	1500	1300	2000	1500	2000	2000	2000	2000	2000	1400	2000	2000	2000	1700	2200
有效功率 N_e (马力)	100	75	54	40	55	60	40	35	27	30	28	20	12	10	10	3
缸 径 d (毫米)	145	125	125	90	115	100	90	85	81	90	125	90	95	95	90	65
行 程 S (毫米)	204	152	162	110	130	120	100	100	101.6	100	125	100	115	115 (110)	100	75
缸 数 i	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1	1
有效扭矩 M_e (公斤·米)	8.2	5.81	2.96	14.3	26.26	21.49	14.6	12.54	9.67	10.74	14.32	7.16	3.58	4.21	3.6	1.07

二 · 转 速

转速是柴油机的另一个主要动力指标。从上述功率计称式 (1—1) 可见，有效功率与转速成正比关系。提高柴油机的转速，有效功率便相应增大，为了保证柴油机有足够的可靠性和较长的使用寿命，使用转速要适当并通过试验来决定。

国家标准规定，在标订标定功率的同时，必须给出其相应转速。一般来说，短时间（如 15 分钟）连续运转的柴油机可采用

较高转速，(2500 ~ 3000 转/分) 较长时间连续运转(如 1 小时)的柴油机转速应适当降低(1500 ~ 2000 转/分)，长时间连续运转(12 小时或持续长时间)的柴油机转速最低(1200 ~ 1500 转/分)。在相同的负荷下，转速提高后，柴油机零件所受的惯性力、摩擦力、机械负荷和热负荷也随之提高，并容易由于机械疲劳和热疲劳而致损坏，使用寿命将缩短。这种情况对工作繁重的拖拉机柴油机是值得注意的。但柴油机总的发展趋势是减小机体重量和容积(减小气缸尺寸 d 和行程 S)，提高转速以获得较大的功率。由于柴油机工作过程不断改进完善、零部件制造工艺质量不断提高，柴油机的转速已逐步提高。

三. 扭 矩

柴油机扭矩是表示曲轴所作的功，是柴油机动力性能 and 实际工作能力的另一表现。

柴油机的功率，也可以通过测功机测定曲轴所实际传出的扭矩和转速计算。当曲轴产生一定扭矩而转速保持稳定并连续运转(15 分钟、1 小时、或 12 小时)时，可计算出它的相应有效功率 N_e 。这扭矩和转速称为柴油机的有效扭矩和转速。

$$\text{功率} = \text{扭矩} \times \text{转速 (转/分)} \times \frac{2\pi}{75 \times 60}$$

$$= \frac{\text{扭矩} \times \text{转速}}{716.2}$$

$$N_e (\text{马力}) = \frac{M_e \cdot n}{716.2} \quad (2-2)$$

式中：

M_e —— 扭矩 (公斤·米)

n —— 转速 (转/分)

例如，490 柴油机在测功机上测出的能维持稳定的有效扭矩和相应转速是： $M_e = 14.6$ 公斤·米， $n = 2000$ 转/分，可计算出它的有效功率 N_e 。

$$\eta_e = \frac{M_e \cdot \pi}{716.2} = \frac{14.6 \times 2000}{716.2} = \frac{29200}{716.2}$$

$$= 40.77 \text{ 马力}$$

将 (1-2) 式代入 (1-1) 式, 消去 π , 可得 (1-2a) 式。

$$\frac{M_e \cdot \pi \cdot 2\pi}{75 \times 60} = \frac{P_e V_h \pi i}{225 \tau}$$

$$M_e = \frac{10 P_e V_h i}{\pi \tau} \quad (2-2a)$$

从 (2-2a) 式可以看到, M_e 主要受柴油机的气缸总排量 $V_h i$ 和平均有效气压 P_e 影响, 而与转速无关。气缸总排量大的柴油机, 有效扭矩也大; 对相同的气缸总排量的柴油机, 平均有效气压高的, 有效扭矩也高。由此可见, 柴油机转速从低速 (空转) 到高速 (标定转速) 变化, 但扭矩变化不大; 并且柴油机的最大扭矩, 往往不是在最高转速情况产生, 而是在中等转速 (或稍高) 情况产生, 这就是扭矩在性质上与功率不同之处。如果柴油机的活塞、活塞环、缸套、气门等主要零件磨损或漏气, 平均有效气压 P_e 值下降, 有效扭矩 M_e 也相应下降。

§2-2 柴油机经济指标

柴油机的主要经济指标是它的每小时燃油消耗量 G_T 和有效燃油消耗率 g_e , 每小时燃油消耗量和机油消耗率。

一、燃油消耗量及燃油消耗率

柴油机工作时, 通过燃油耗测量设备可以测量该机每小时燃油消耗量。柴油机发挥不同功率时, 每小时燃油消耗量是不相同

的，因此，常用有效燃油消耗率（ g_e ）表示该机燃油经济性能的好坏。如果柴油机发出有效功率 N_e 时，每小时消耗燃油 G_T 公斤，则：

$$g_e = \frac{1000 G_T}{N_e} \quad \text{克/马力小时} \quad (2-3)$$

g_e 实际上表示柴油机每作一有效马力小时的功所消耗的燃油量，是用来评价柴油机燃油经济性能的重要指标。目前，我国拖拉机用的柴油机 g_e 值一般是 150 ~ 230 克/马力小时。

g_e 值小的表示柴油机的燃油经济性好。表 2—2 列出各种柴油机的 g_e 值，以供参考。

表 2—2 柴油机经济指标值

机 车 型 号	红旗 100	东方红 75	东方红 54	铁牛 60	铁牛 55	东方红 40	红旗 40	丰收 35	东方红 30	东方红 28	丰收 27	东方红 20	工农 12	东风 11	工农 10	工农 3
柴油机 型 号	4146T	4135A	AF54	4100	4157	490	490	485	490	415	481	490	495	495	490	495
有效燃油消 耗率 g_e 克/马力 小时	210	200	220	180	195	165	155~15	210	155~200	205	230	190	195	200	180	230
机油消耗率 j_{Fe} 克/马力小 时	4	7~8	7.7~ 8.8	3	6	5	5.5	3	3.7 ~5	7.0	6.9	4	4~5	5	5	
燃油消耗量 G_T 公斤/小时	满载	168	12~	10~	8~	7.8	6~	5.6	4.5	4.8	5~	3.0	1.8	1.8	1.5~	0.6~
	作业	~21	15	11.8	10.8	~10.7	7.6	7.6	~7	~5.8	~5.7	6.2	~3.8	~2.2	~2.2	1.9
	运输	10.5 ~12.5	8~	6~	4.8 ~	4.7 ~	3.6 ~	3.6 ~	2.7 ~	2.8 ~	2.8 ~	1.8 ~	1.1 ~	1.1 ~	0.9 ~	0.4 ~
空 转 情 况	2~	1.5 ~	1.2 ~	1~	0.6 ~	0.6 ~	0.6 ~	0.6 ~	0.6 ~	0.6 ~	0.6 ~	0.26 ~	0.26 ~	0.26 ~	0.23 ~	0.1 ~
米	22	1.8	1.4	1.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.32	0.32	0.32	0.3	0.15

米 注： 数值仅供燃油消耗足额参考。

植制造厂资料；机油消耗率 j_{Fe} 是：东方红—75、54， g_e 约 3.5~4%。东方红—28， g_e 约 3.5%。

二、机油消耗量和机油消耗率

柴油机工作时，通过机油损耗可以测量该机每小时润滑机油消耗量。如果柴油机发出有效功率 N_e 时，每小时消耗机油 j_{Fe} 公斤，可按下式计算机油消耗率 j_{Fe} ：

$$j_{Fe} = \frac{1000 j_{Fe}}{N_e} \quad \text{克/马力小时} \quad (2-4)$$

j_{Fe} 实际上表示柴油机每作一有效马力的功所消耗的机油量，是评价柴油机机油经济指标。对于拖拉机使用人员来说， j_{Fe} 是一个不容忽视的指标。目前我国拖拉机用的柴油机， j_{Fe} 值一般是 3~7 克/马力小时，参阅表 2-2 的 j_{Fe} 值。

§ 2—3 柴油机有效效率

柴油机的有效效率表示柴油燃料所含的热量转变为有效功的利用程度。因此，有效效率 η_e 是柴油机动力性和经济性的综合指标。

我们知道，1 马力小时的功与 632 千卡的热量相当。如果柴油机的燃油消耗率是 g_e 克/马力小时，而柴油机的热值是 $H_{柴油}$ 千卡/公斤（柴油的热值为 $H_{柴油} = 10,000 \sim 10,150$ 千卡/公斤，一般可作 10,000 千卡/公斤， $\frac{g_e}{1000} H_{柴油}$ 就是柴油燃烧所产生的热量，也就是柴油机产生 1 马力小时有效功的实际消耗热量。有效效率 η_e 就是 1 马力小时的有效功与所消耗热量之比。

$$\eta_e = \frac{632}{\frac{g_e}{1000} H_{柴油}} = \frac{63200}{g_e H_{柴油}} \quad (2-5)$$

目前，我国拖拉机柴油机的有效效率值是 0.3~0.4，即柴油燃料热量的 30~40% 转变为有效功，其余热量随冷却水

(25~30%)，废气排出(40~45%)，以及其他方面消耗掉(5%)。

第三章 柴油机工作过程分析

柴油机的动力经济性能、可靠性和耐久性取决于工作循环的完善程度和各工作过程的具体问题的妥善解决，以及各机构零件的材料结构、加工精度、润滑散热情况等等的圆满解决。下面主要分析柴油机工作循环各过程对柴油机动力性和经济性指标的影响，并尽量多从使用修理角度来介绍。

§3—1 柴油机工作循环示功图

从理论上去分析研究柴油机工作循环，可将柴油机工作过程的一些因素(包括温度)略去，只考虑柴油机气缸内压力容积变化这两个因素的关系。柴油机气缸内的压力随气缸容积变化的情况用简图来表示，称为示功图。

图3—1所示的气缸压力—容积图是四冲程柴油机工作循环示功图。r a线表示进气过程，a c线表示压缩过程，c z线表示燃烧过程，z b线表示膨胀过程，b r线表示排气过程。它们表明了气缸内工质的做功情况，这样的图形可用示功仪这种专门仪器测定并绘出。

在示功图上， $b''c'z'b'b''$ 这个上面的环形面积代表工质推动活塞所作的功(有“+”号)，代表循环的指示功，用 W_i 表示。下面环形面积 $r'r'a'b''$ r' 为活塞在进行排气过程的能量损失(有“-”号)，称为泵气损失，属于柴油机机械损失的一部分。如果用面积仪量出示功图中“+”号面积 $b''c'z'b'b''$ ，并将这个面积转化为一个矩形面积 $a'c'z'b''$ 。这个矩形的长度表示气缸容积 V_b ，高度则为气缸内的平均指示压力 P_i ，矩形 $a'c'z'b''$ 面积代表一个循环的指示功 W_i ， $W_i = P_i V_b$ 。