

内燃机性能及其与 传动装置的优化匹配



版社

内燃机性能及其与传动 装置的优化匹配

杨连生 著

学术期刊出版社

内 容 提 要

本书介绍了内燃机的基本性能——内燃机调节特性、速度特性、负荷特性、调速器与调速特性——和性能的提高途径，重点介绍内燃机的万有特性和作者提出的内燃机动力装置的万有特性，并在此基础上以汽车为重点，阐述内燃机性能与传动装置的经济性匹配和动力性匹配，(即优化匹配)，对于内燃机性能与拖拉机、工程机械和船舶传动装置的匹配也作了简要的介绍。

本书可供从事汽车、内燃机、拖拉机、农用固定动力装置、农业机械、工程机械、船舶动力装置的工程技术人员进行设计和动力配套工作时参考之用，也可作为有关专业的大学生、研究生的教学参考书。

内燃机性能及其与传动装置的优化匹配

杨连生 著

学术期刊出版社出版

(北京海淀区学院南路88号)

新华书店北京发行所发行

北京华新科技印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 8.75 印张

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

印数：1—7 500

ISBN 7-80045-047-3/TH·1

定 价 4.50元

前 言

内燃机以其极好的热效率和机动灵活性广泛地应用于各行各业。仅以汽车为例，全世界的保有量已达5亿辆，以每辆功率 80kW (81.6PS) 计，总功率已达300亿 kW 。这个数字比世界总发电量还多得多。

但是，第一流的内燃机加上第一流的底盘并不一定等于第一流的汽车。其他如拖拉机、工程机械、农用军用内燃动力装置等也都是如此。其中有个关键的环节常被忽视，那就是“匹配”。“大马拉小车”者有之，“千里马变成油老虎”者有之。在实际使用中，“拉郎配”者有之，“乱点鸳鸯”者有之，使得内燃机的性能不能充分发挥。“用非所长”，“用非所宜”屡见不鲜。近年来，“匹配”问题已逐步引起重视，但这方面的参考资料却寥若晨星。本书试图从根本上解决“匹配”问题。全书以“匹配”为中心共分两篇，第一篇论述内燃机的性能（特性）和性能的提高途径、匹配中对性能的要求；达到这些要求所应采取的措施及内燃机本身的“匹配”问题。第二篇论述内燃机与传动装置（底盘）的优化匹配，包括经济性匹配与动力性匹配。在解决“匹配”问题时，主要用作者提出的“汽车万有特性”（内燃机动力装置的万有特性之一）使得这一错综复杂的问题变得比较简单明了。

限于作者水平，加之时间仓促，鲁鱼帝虎，在所难免，疏漏谬误不无可能。竭诚希望读者批评指正，使本书日臻完善。

本书在编写过程中得到了刘敬平、彭立新、杨靖、左晓晖等同志的协助，特此鸣谢！

作 者

1987年12月于湖南大学

目 录

第一篇 内燃机的性能 (特性)

第一章 内燃机性能 (特性) 总论	(1)
第一节 内燃机的工况与相应的内燃机特性	(1)
第二节 内燃机的静态特性	(6)
第三节 耗能装置的静态特性	(7)
第四节 内燃机特性主要评价指标	(22)
第五节 有关的匹配问题	(33)
第二章 内燃机的调节特性	(34)
第一节 内燃机的燃料调节特性	(34)
第二节 点火 (或喷油) 提前角调节特性	(48)
第三节 汽油机的爆震特性	(54)
第三章 内燃机的速度特性	(60)
第一节 汽油机的速度特性	(60)
第二节 柴油机的速度特性	(67)
第三节 汽车发动机理想特性和速度特性的调整	(71)
附录 内燃机外特性的绘制方法	(74)
第四章 内燃机的负荷特性	(78)
第一节 汽油机的负荷特性	(78)
第二节 柴油机的负荷特性	(81)
第三节 发动机负荷特性与汽车燃料经济性能的关系	(82)
第五章 内燃机的调速器和内燃机的调速特性	(89)
第一节 概述	(89)

第二节	调速器的基本特性	(93)
第三节	调速器的分类及其工作原理	(96)
第六章	内燃机的万有特性	(129)
第一节	内燃机万有特性概述	(129)
第二节	万有特性的研究和表示方法	(131)
第三节	万有特性应用分析	(135)
第二篇 内燃机与传动装置的优化匹配		
第一章	传动装置的牵引动力学	(145)
第一节	汽车的牵引力	(145)
第二节	汽车的运动阻力	(151)
第三节	汽车的动力特性	(167)
第二章	内燃机动力装置的万有特性	(200)
第三章	内燃机与传动装置的经济性匹配	(213)
第一节	能源和汽车节能	(213)
第二节	汽车与发动机匹配的基本关系式	(216)
第三节	经济性匹配分析示例	(219)
第四节	改善经济性匹配的途径	(226)
第五节	不同载重量与不同道路坡度时汽车 经济性匹配的变化	(231)
第六节	经济车速与实用车速	(231)
第七节	本章小结	(243)
第四章	内燃机与传动装置的动力性匹配及 传动比的选定	(244)
第一节	内燃机适应性(弹性,柔性)的评价	(244)
第二节	内燃机扭矩曲线的计算	(249)
第三节	发动机扭矩曲线形状与汽车的动力性能	(250)
第四节	汽车性能与传动比的关系	(253)

附录 1 常用符号与单位表·····	(272)
附录 2 单位换算表·····	(273)
参考文献·····	(273)

第一篇 内燃机的性能 (特性)

第一章 内燃机性能 (特性) 总论

第一节 内燃机的工况与相应的内燃机特性

为满足不同动力机械的需要, 要求内燃机能在一定的转速和扭矩范围内工作。作为动力装置, 它应反映为输出一定的功率和速度, 以满足一定的负载要求。内燃机的外界负载是多种多样的, 但就其性质来说, 可分为稳定负载和不稳定负载两大类。不稳定负载使发动机处于不稳定工况, 转速或油门位置(对于汽油机指节流阀开度; 对于柴油机指油泵油门拉杆位置)处于运动状态, 发动机的工作过程处于过渡状态。在稳定负载时, 转速和油门位置相对较稳定, 处于相对的静止状态, 其工作特性也便于用静态的特性来表示。严格地说, 大部分内燃机动力装置的负载是属于动态的。例如汽车发动机80%以上的工况处于不稳定的过渡状态。但迄今为止, 不稳定工况还不能用一定的不稳定的、动态的或过渡性的特性来表示。故本章所述的内燃机的特性都是指静态特性而言的。当前人们还只能用静态的或准静态的参数来近似地描述内燃机动态的或过渡态的特性。

汽车发动机具有最典型的各种负载。速度的变化范围也较广，要求它能在外特性和调速特性（柴油机）所包容的面积内的任何一点工作。当汽车利用发动机制动和排气制动时，其工作范围还包括发动机作负功的横坐标以下的负面积区域，如图 1-1 所示。

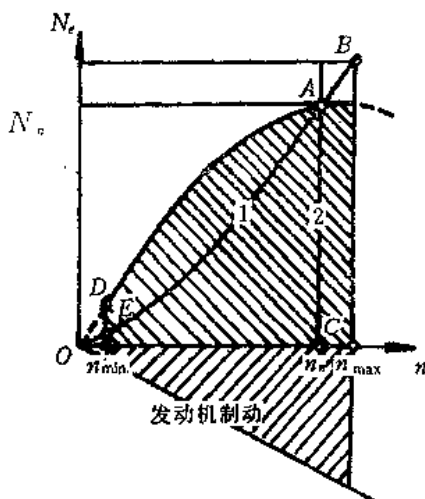


图 1-1 内燃机可能的工作范围

每个参数的变化范围，取决于发动机的用途，并受到它的强度、热力性能和气体动力性能的限制。例如，内燃机曲轴转速只能在限制的范围内变化。许多因素不允许发动机超过规定的最大曲轴转速 n_{max} ，否则，从强度的观点看，会使发动机零件惯性力超过容许值，也将导致发动机气缸内工作过程的恶化，以及增加发动机零件的热应力等。有时发动机需要用最低转速工作（例如汽车在车站暂时停车时）。在这种速度工况下，发动机应当稳定地工作。如果转速降低到最低极限 n_{min} 以下，就会出现工作中断，致使发动机自行停车。因而，发动机的速

度工况，既受上限 n_{max} 的限制，又受下限 n_{min} 的限制（图 1-1）。

在每个速度工况，发动机的功率可以从零（空转）或负值（发动机制动）变到该发动机在给定的速度工况时所能发出的最大值。最大功率取决于工作过程正常进行的条件。

综上所述，发动机可能的稳定工况处在某一区域，这个区域可用阴影面积表示。这个面积的纵坐标以最大可能功率 N_{max} 为限，横坐标以最低速度工况 n_{min} 和最高速度工况 n_{max} 为限，坐标点 A (N_n, n_n) 相当于标定工况。一般技术条件规定发动机有短时间超载 10—15% 的能力，这个工况在图 1-1 上用点 B 标出。点 C 相当于标定转速时的空转工况。点 D 和点 E 相当于可能的最低速度工况。

发动机在每个稳定工况工作的各参数之间存在着由发动机工作过程理论所确定的函数关系。例如发动机的有效效率 η_e 与平均指示压力 p_i 、机械效率 η_m 、增压空气压力 p_k 、增压空气温度 T_k 、充气系数 η_v 之间的关系为

$$\eta_e = 1.985 \frac{M_1 p_i \eta_k T_k}{H_u \eta_v p_k} \quad (1)$$

式中 M_1 ——在压力 p_k 温度 T_k 条件下充气后气缸内的实际空气量 (mol 数)； H_u ——燃油低热值。

平均有效压力为

$$p_e = k \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho_k \eta_k \quad (2)$$

式中 ρ_k ——空气密度。

这些关系可综合表示为

$$N_e = f(M, n, p_k, T, h, \alpha, \eta_v, \eta_i, \eta_m, \dots) \quad (3)$$

发动机的每个稳定工况总是由是否包含以上关系式中的全

部参数随时间而不变来决定。这个关系式可以表示为多元曲面，曲面上各点关系式中，对应一定稳定工况的所有参数的一组具体数值。

然而在许多情况下，并不需要考虑描述发动机在稳定工况工作的所有参数，而只需要选取一个或几个最有意义的参数就够了。属于这类参数的有 M ——发动机扭矩； n ——曲轴转速； h ——喷油泵齿杆位置或者 Δg ——循环供油量等。如果将使循环供油量减小齿杆移动方向取为正方向，那么上面这三个参数作为一组，将得到曲面 A （图1-2）。曲面 A 上的每个点都对应着一个稳定工况。

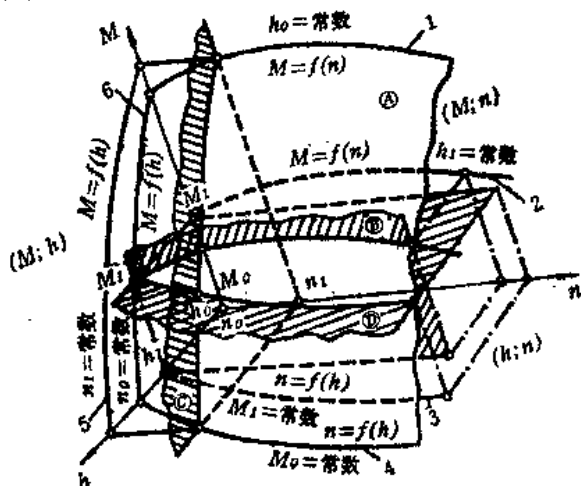


图1-2 发动机静态特性的综合

有时为描述发动机的稳定工况，从式（3）的参数中选定某个参数作为常量，并按照它的数值来表征发动机的某个稳定工况。例如，发动机油门开度为固定值，叫做相应的负荷稳定工况（当 M =变量， n =变量时， h =常数）；曲轴转速 n 为固定值，叫做某一转速稳定工况（当 M =变量， h =变量时， n =

常数)；转速和负荷都变化很小或不变时，叫固定式特性；冷却水温度 T 为不变值，叫做发动机相应的热状态稳定工况，等等。有些情况下，所有稳定工况上各个参数之间都保持着一定的关系。例如螺旋桨阻力矩 M_e 与转速 n 之间的关系式为 $M_e = \Phi \cdot n^2$ ，因而船用发动机的所有静态稳定工况，都位于抛物线 EA 上(见图1-1)，而抛物线 EA 就相当于发动机的船用工作条件。

发动机在运输条件下，有可能处于任一速度工况和负荷工况。所以，图1-1上的阴影面积表示运输式发动机可能的工况区域。

如果发动机在使用过程中，在一系列的稳定速度工况和负荷工况下工作，通常就说，这种发动机在变工况下工作。例如可以说，运输式发动机在变速度和变负荷的工况下工作；而固定式发电柴油机在一个稳定速度和变负荷工况下工作。

按照内燃机的动力装置的负载对扭矩(在一定的程度上对应内燃机的油门位置 h)和速度(对应内燃机的转速)的要求，内燃机的工况可分为以下三种典型的工况。每一种工况按条件都有其对应的工作特性，兹分述如下：

1. 点工况——负载要求内燃机在一定的扭矩 M_e 和一定的转速 n 下工作。固定式内燃机的工况具有这种性质，除了起动和过渡外，内燃机的油门位置和转速变化很小，这种发动机只要求在标定点具有良好的性能指标。

2. 线工况——又可分为三种情况：

(1) 转速一定，油门位置按负荷大小改变。如内燃机与同步发电机工作时，其工况就接近如此，内燃机以对应的负荷特性工作。

(2) 油门位置一定，转速改变。扭矩 M_e 与转速 n 大致按

一定的规律改变(一般 $M_e = cn^2$), 内燃机与螺旋桨、离心水泵、压气机等工作时的工况就类似如此, 此时内燃机按外特性、速度特性或螺旋桨特性工作。

(3) 油门位置与转速按负载的性质以一定规律改变, 这对应内燃机的调速特性。

3. 面工况——油门位置与转速均在外特性、调速特性所包含的范围内变化, 而且这种变化没有一定的规律可循, 汽车发动机的工况就是如此, 对应的内燃机工作特性为万有特性。

第二节 内燃机的静态特性

如果需要强调能够正确代表稳定工况的各参数之间某种相互关系, 可从式(3)的多种相互关系中选出所需的参数, 并以此建立发动机静态特性。为此, 利用曲面A(见图1-2): 通过与各坐标平面平行的平面B、C和D分别与这个曲面A相截, 便可得到相应的静态特性。

坐标平面 $(M; n)$ 与曲面A的交线“1”为发动机的速度特性 $[h_e = \text{常数}, M = f(n)]$, 平行于坐标平面 $(M; n)$ 的平面B与曲面A的交线在坐标平面 $(M; n)$ 的投影“2”为发动机的部分负荷速度特性 $[h = \text{常数}, M = f(n)]$ 。同理, 可在坐标平面 $(h; n)$ 上得到发动机的调节特性“3”和“4”

$[M = \text{常数}, n = f(h)]$, 在坐标平面 $(M; h)$ 上得到相应的特性曲线“5”和“6” $[M = f(h), n = \text{常数}]$ 。以上对所选取的三个参数 M 、 n 和 h 的叙述, 完全适用于其他任何三个参数。

任意静态特性上的每个点, 都是由函数关系式(3)确定的, 曲面A上的每个点, 只对应一个稳定工况。面发动机的每

条静态特性都是在一定条件下（如某个参数为常数），由一定参数标志的一系列连续稳定工况构成的。一个稳定工况决定某一静态特性上的一个点，例如柴油机速度特性（图1-3）或者负荷特性（图1-4）上的点B。处于此工况，参数 $M_B, n_B, h_B, g_{cB}, N_{cB}$ 都具有确定的数值。

上面关于静态特性的论述说明，静态特性可以用来确定发动机的某些静态性能，也可用图像形式表示一定条件下发动机稳定工况时几个参数的相互关系，即静态特性。

第三节 耗能装置的静态特性

发动机输出的动力被某种具有固有静态特性的耗能装置吸收，这种静态特性称做耗能装置特性，即 $M_c = f(n)$ (M_c ——耗能装置阻力矩)。有时把这种关系式称为阻力特性。

一、测功机的特性

在进行发动机试验时，常常使用水力测功机，当测功机的规格一定时，其转子所消耗的功率与转速的关系，近似符合三次抛物线规律

$$N_c = \Phi_N n^3 \quad (4)$$

式中 Φ_N ——与测功机结构参数有关的系数。

考虑到功率和扭矩的已知关系，可以把水力测功机的静态特性，表示为

$$M_c = \Phi_{Mn} n^2 \quad (5)$$

水力测功机功率和阻力矩的变化速率，可以通过改变测功机工作液体的充入量（通过调节耗能装置）来改变，图1-5为测功机功率的吸收曲线，图中还示出了CA10B汽油机和杭发HZ6120柴油机的外特性，由图可见后者在D-350水力测功

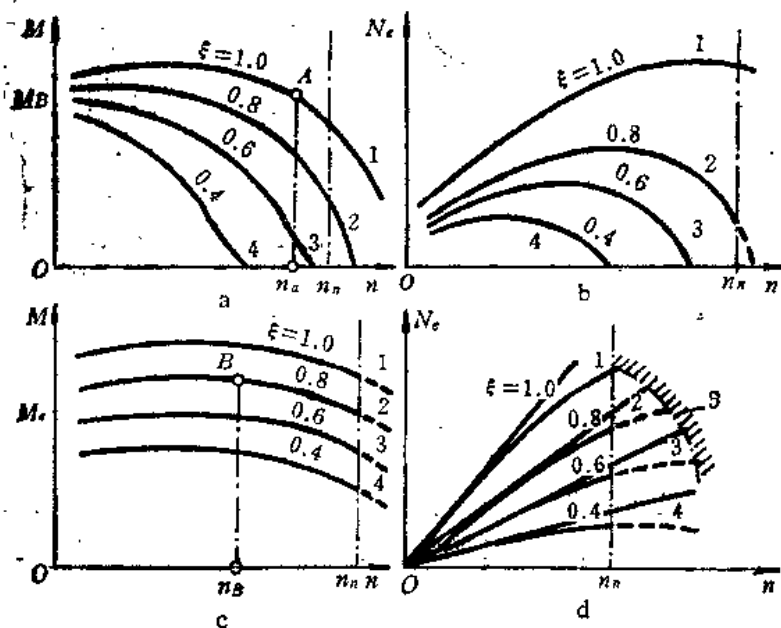


图 1-3. 内燃机的速度特性

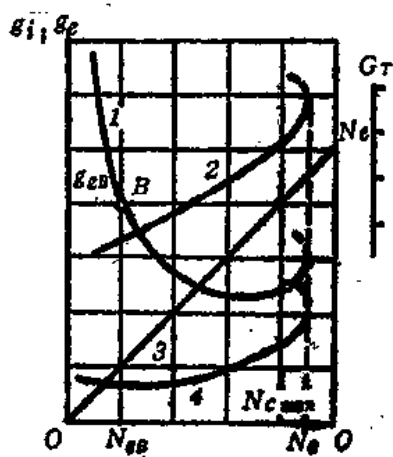


图 1-4 柴油机的负荷特性

机上低速部分就超过了吸收范围。图 1-6 中示出了耗能装置的静态特性。

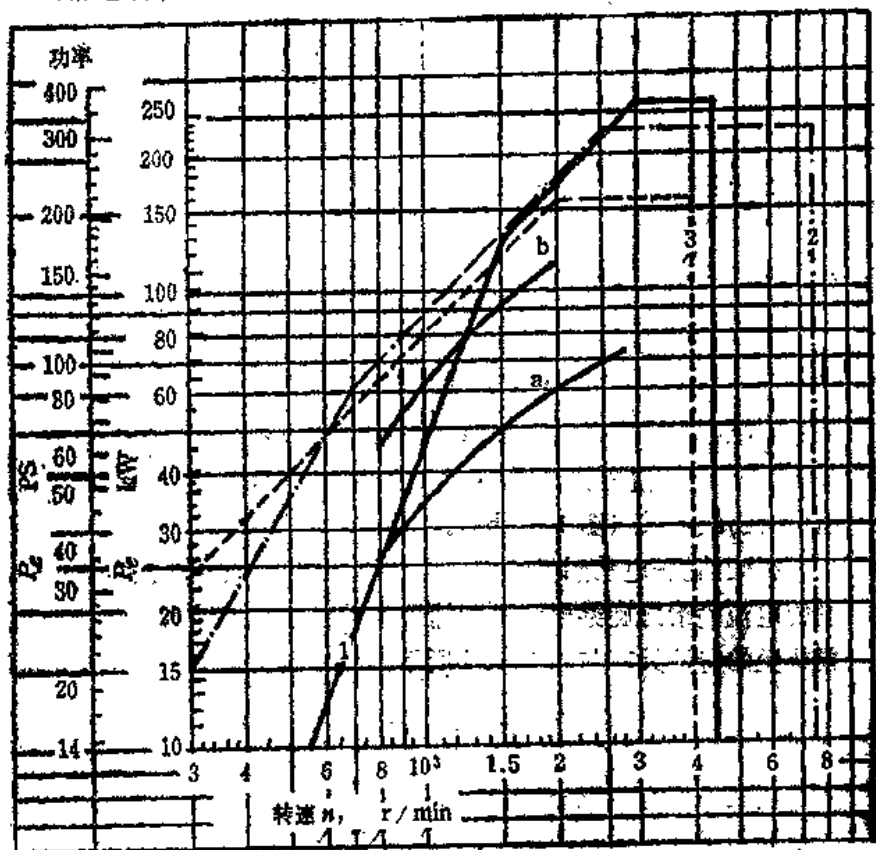


图 1-5 测功机功率吸收曲线

二 船舶动力特性

船用不变螺距螺旋桨的静态阻力特性和水力测功机静态特性具有相似的形状。

在内燃机试验中，应用最广泛的还有电力测功机。这种测

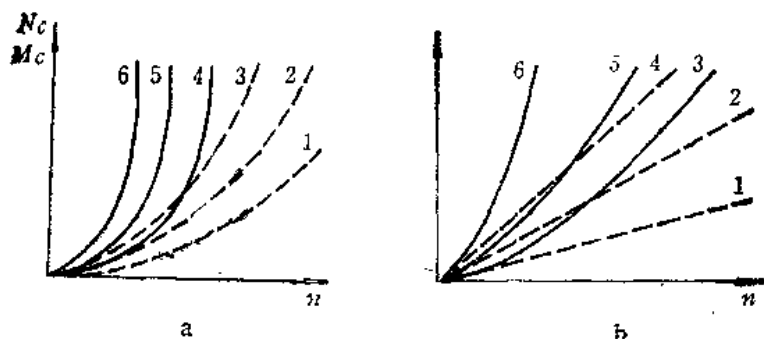


图 1-6 耗能装置的静态特性

(a) 工作液体充量不同的水力测功机特性；(b) 各种恒定调整条件下的电力测功机特性；1、2和3—— $M_c = f(n)$ ；4、5和6—— $N_c = f(n)$ ；功机所吸收的功率与转子转速的关系呈二次抛物线，即 $N_c = B_n n^2$ 。因此，扭矩特性 $M_c = B_m n$ 在图像上呈现为从坐标原点引出的射线形式（图 1-6 b）。

在柴油机-电动船机组中，发动机的耗能装置是发电机，它的电流输给螺旋桨电动机和辅助电动机。在这种情况下，耗能装置的特性具有与图 1-6 b 所示的电力测功机的类似形状。

三、车辆特性

安装在机车、汽车或拖拉机上的发动机，其阻力特性决定于道路质量和发动机的工况。

在这种情况下，运动阻力基本上是由滚动阻力 F_r 、路面斜坡阻力 $W \sin \alpha$ 和迎风阻力 $C_D F v_s^2$ 构成的。 W ——机车、汽车或拖拉机的质量； α ——路面倾斜角； C_D ——流线型系数； F ——车辆迎风面积； v_s ——车辆运动速度 (km/h)。

因此，施予发动机的总阻力为

$$P = F_r + W \sin \alpha + C_D F v_s^2 \quad (6)$$