

船舶内燃机动力学

朱孟华 编著



国防工业出版社

船舶内燃机动力学

朱孟华 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书较系统地叙述了船舶内燃机动力性能方面的有关问题。全书分十章，基本内容有：内燃机运动机构的作用力分析、内燃机的发火顺序、内燃机的输出扭矩及飞轮惯量计算、内燃机轴颈及轴承负荷的分析、内燃机振动力源的分析、平衡方法以及基座振动等问题。书中除对基本原理的叙述和推导外，还列入了具体运算实例以供读者参考应用。

本书可供船舶内燃机专业师生使用，也可供其它有关内燃机专业师生以及内燃机设计、制造、使用部门的工人、技术人员参考。

船舶内燃机动力学

朱孟华 编著

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张16¹/₄ 376千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数：0,001—5,700册

统一书号：15034·1832 定价：1.70元

目 录

第一章 内燃机运动机构的型式、组成及其分类	1
§ 1-1 内燃机基本运动机构的型式及其分类	1
§ 1-2 各种型式的内燃机结构组成及其分类	3
第二章 正置式活塞机构的运动学及动力学	7
§ 2-1 活塞的位移	7
§ 2-2 活塞的速度	13
§ 2-3 活塞的加速度	16
§ 2-4 连杆的运动	21
§ 2-5 回转机件及往复运动机件的惯性力	24
§ 2-6 连杆惯性力	26
§ 2-7 正置式活塞机构上力的作用情况及其计算	29
§ 2-8 正置式活塞机构作用力计算举例	31
第三章 付连杆式活塞机构的运动学及动力学	39
§ 3-1 付活塞的位移	39
§ 3-2 付活塞的速度及加速度	41
§ 3-3 付连杆式活塞机构的冲程及上下止点偏角	42
§ 3-4 付连杆销的运动	45
§ 3-5 付连杆式活塞机构上力的作用情况及其计算	46
§ 3-6 V型主付连杆式发动机运动参数及动力计算举例	51
§ 3-7 付连杆式活塞机构基本尺寸的确定	57
第四章 内燃机的发火顺序	66
§ 4-1 内燃机的发火顺序及其选定时所需考虑的因素	66
§ 4-2 单列式发动机的发火顺序	68
§ 4-3 单轴多列式发动机的发火顺序	70
第五章 内燃机的输出扭矩、回转不均匀度及飞轮惯量计算	73
§ 5-1 内燃机的输出扭矩	73
§ 5-2 内燃机的回转不均匀度及飞轮惯量计算	74
第六章 内燃机轴颈及轴承负荷的分析及其计算	80
§ 6-1 概述	80
§ 6-2 曲柄销及连杆轴承负荷的计算	80
§ 6-3 付连杆销及付连杆轴承负荷的计算	86
§ 6-4 主轴颈及主轴承负荷的计算	88
§ 6-5 曲轴上敷设平衡重对主轴承负荷的影响	107
第七章 单列式发动机振动力源的分析及其平衡方法	110
§ 7-1 发动机平衡概述	110
§ 7-2 单缸发动机振动力源的分析及其平衡方法	111

§ 7-3	单列式多缸发动机振动力源的分析及平衡特性系数表	119
§ 7-4	发动机的内部平衡特性	137
§ 7-5	单列式多缸发动机的平衡方法	142
§ 7-6	发动机平衡重块的设计及其平衡量的计算	154
§ 7-7	发动机不平衡程度的估价	158
第八章	单轴多列式发动机气缸夹角的确定及其振动力源的分析	160
§ 8-1	单轴多列式发动机概述	160
§ 8-2	确定单轴多列式发动机气缸夹角时所应考虑的因素	163
§ 8-3	单轴多列式发动机能满足均匀发火的气缸夹角数值	168
§ 8-4	V型发动机振动力源的分析	173
§ 8-5	单轴多列式单排发动机振动力源的分析	185
§ 8-6	单轴多列式多排发动机振动力源计算举例	195
§ 8-7	单轴多列式发动机的平衡方法	202
第九章	对向活塞式发动机的运动特点及其振动力源的分析	209
§ 9-1	对向活塞式发动机概述	209
§ 9-2	双轴对向活塞式发动机运动特点的分析	212
§ 9-3	单轴对向活塞式发动机运动特点的分析	218
§ 9-4	双轴对向活塞式发动机振动力源的分析	221
§ 9-5	单轴对向活塞式发动机振动力源的分析	226
第十章	内燃机装置基座的振动及其减振	230
§ 10-1	内燃机装置基座振动的概念	230
§ 10-2	单自由度内燃机装置基座的振动分析	231
§ 10-3	一般情况下内燃机装置基座的振动分析	237
§ 10-4	弹性基座的结构形式以及有关基座振动的若干问题	242
§ 10-5	发动机内力矩对基座输出力矩的分析	247
参考文献		254

第一章 内燃机运动机构的型式、组成及其分类

§ 1-1 内燃机基本运动机构的型式及其分类

从现有或曾有过的内燃机来看，其型式是异常繁多的。有的在一个气缸中仅有一个活塞，而有的则有两个、甚至三个以上的活塞；有的发动机只有一根回转曲轴，而有的则有两根、三根以至六根曲轴；有的发动机其曲轴的每一单位曲柄只带动一套活塞连杆组合，而有的甚至同时带动八、九套活塞连杆组合；有的发动机呈直列式布置，而有的则为卧式、倾斜式以及三角形、四方形式、叠饼式等布置，种类相当繁多。因此摆在动力学学科面前的任务也是艰巨而又复杂的。但是，即使是型式这样繁多，只要我们细致地加以解析与归类，不难发现，其运动机构的基本型式、种类是并不多的。由于我们这里不讨论当前较新的回转式内燃机，因而最基本的机构类型仍然越不出曲柄-连杆机构的范畴，只是在活塞、连杆、曲轴三者的连接关系上存在着一些差异，从而组成具有不同型式的运动机构。这些基本的运动机构又组合成各种复杂型式的内燃机结构。因此我们若能首先对这些基本运动机构的运动学、动力学进行透彻的分析研究，再进一步分析各种型式的内燃机机型也就不难了。

从现有或曾有过的内燃机来看，比较主要的基本运动机构有以下四种型式：

1. 正置式活塞机构

这是曲柄连杆机构（以后都简称活塞机构）的基本型式，它的特点是曲柄的回转中心与作直线往复运动的活塞销中心的运动轨迹（即气缸中心线）处于同一直线内，而该直线与曲轴的回转轴相互垂直。上述结构的线示图如图1-1(a)所示。图1-1(b)系十字头式发动机的运动机构线示图。不难得出，从运动学的观点来看，两者是完全一致的。

当前世界上所有的内燃机中，绝大部分都采用这种结构型式，因此又常称为“标准活塞机构”。这种机构的运动学及动力学也是我们研究的重点。

2. 偏置式活塞机构

偏置式活塞机构的特点是曲柄的回转中心不在气缸中心线上，而是偏向侧方一个小距离 e ，如图1-1(c)所示。

偏置式活塞机构的特点是可以减小活塞向气缸壁所作用的侧推力。由图1-1(c)可见，当气缸中心线偏于回转中心右方时，只有当发动机为顺时针方向回转时，才能减小爆炸冲程时的最大侧推力，否则最严重的侧推力反而将增大。反之，当气缸中心线处于回转中心左方时，发动机则应作逆时针方向的回转。由此可见，这种型式的运动机构，不适宜用于可反转式发动机中。此外，即使对于非反转式发动机，上述型式的运动机构也常常会因为系列化生产的要求——例如左右机的变型设计，回转方向的订货要求等等——而使人们对这种转向上的限制感到不便。因此这种运动机构，目前除了某些高速小型发动机尚有采用外，对于功率要求较大的船用、机车用发动机，已经极少采用。

偏置式活塞机构的另一特点是在同样的曲柄半径下，其活塞总行程要比正置式活塞机构的略大一些，也就是说，在同样的尺寸重量下，它可以具有较大的气缸工作容积，因而可以使功率稍有增加，也即重量尺寸指标较轻。但一般由于结构上的缘故，偏距 e 都取得较小，因而由此获得的效益不是很显著的。

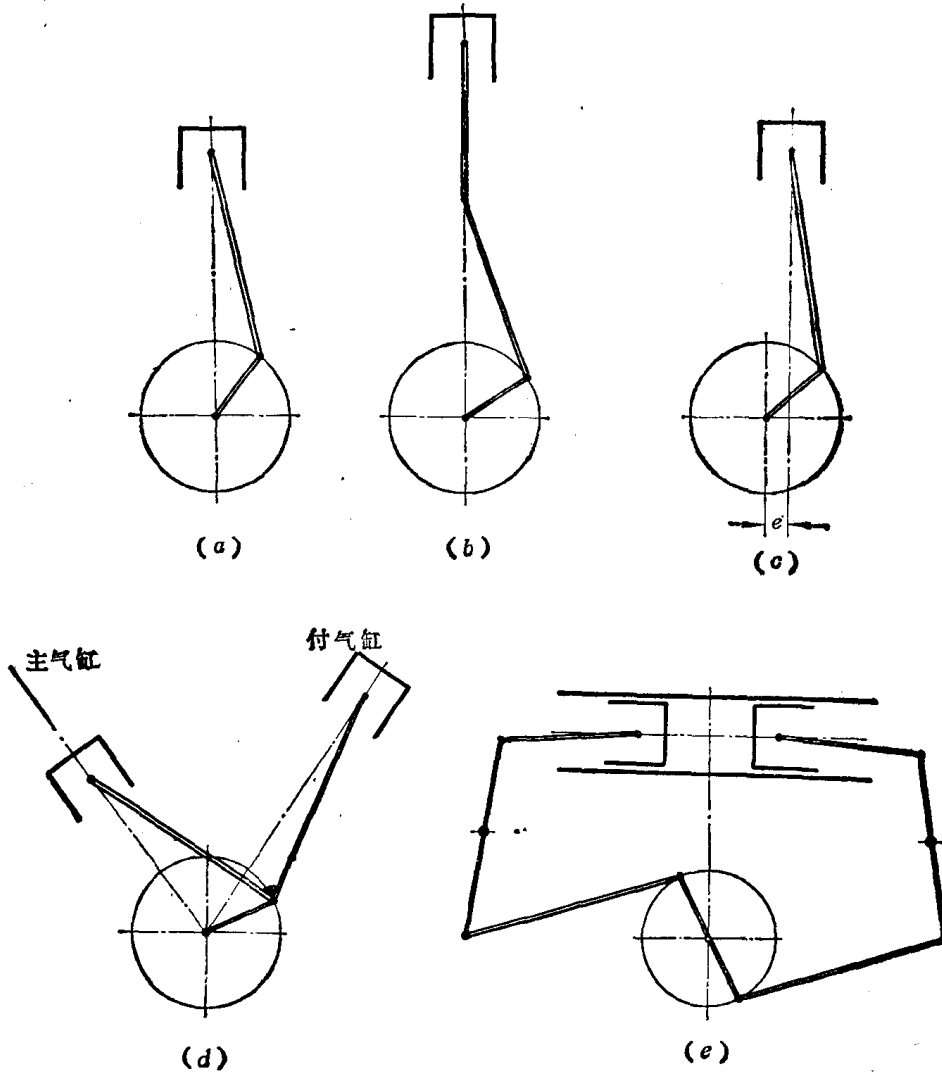


图 1-1

3. 付连杆式活塞机构

付连杆式活塞机构是指连杆的大端并不直接连接在曲柄销上，而是通过连接销子连接在“主连杆”大端上，形成关节式的运动付，因此又常称为“关节连杆式活塞机构”。它与一套正置式活塞机构（通常称为“主连杆”机构）共同组成整个发动机的运动机构。根据发动机列数的不同，在一套主连杆大端上，将连接着一至数套付连杆机构。一般与付连杆相应的气缸称为付气缸，而与主连杆相应的则称为主气缸。图1-1(d)所示是双列式(V型)发动机的主付连杆运动机构线示图。

由于付连杆机构能够解决在一档曲柄上同时连接几套活塞连杆组合的问题，因此它是星型活塞式航空发动机的标准运动机构。在船舶或机车方面应用较多的V型发动机中，虽然

完全可以采用其它的结构型式(如并列式, 义型式等) 来解决一档曲柄上连接两套活塞连杆组合的要求, 但是由于主付连杆式活塞机构具有可使发动机主动机件构造紧凑的优点, 这对于发动机的重量尺寸指标是有利的, 因此也有不少V型发动机采用这种型式的活塞机构。

4. 天平杆式活塞机构

图1-1(e) 是一天平杆式活塞机构的线示图。活塞的往复运动通过作摇摆动作的天平杆及连杆转化成为曲柄的回转运动。水平布置的两个活塞组成对向的运动方式, 因此这是一种二冲程的、对向活塞式发动机。

这种运动机构的特点是可以获得具有对向活塞式机构的二冲程工作方式。这种工作方式的工作容积较大, 强载程度较高。但是它与其他型式的二冲程对向活塞式发动机相比, 可以大大减小某一方面过份突出的尺寸(如直立时高度很大, 横卧时则宽度又太大), 而具有结构非常紧凑的优点。这种活塞机构用于某些强载性要求较高的汽车发动机上比较适宜, 例如瑞士 Sulzer 工厂曾生产这种型式的、用于汽车上的高速发动机。但是由于这种运动机构的构造比较复杂, 优点相对说来并不突出, 因此没有获得广泛的发展。

总起来讲, 内燃机中比较主要的运动机构, 有上述四种, 其中以正置式活塞机构应用最多。近年来, 由于内燃机单机功率及强载程度的不断提高, 多列式发动机的大量涌现, 促使付连杆式活塞机构在船舶及机车发动机上获得了广泛的应用, 因此我们将重点对正置式及付连杆式这两种运动机构型式进行分析和讨论。

§ 1-2 各种型式的内燃机结构组成及其分类

如前所述, 从世界上曾有及现有发动机来看, 内燃机的结构型式是非常繁多的, 可以说简直到了不胜枚举的地步。但是即使型式是这样的繁多, 我们仍可以用综合归纳的方法, 分成若干类型, 归纳起来可分以下几种:

1. 单列式发动机

发动机的所有气缸都排成一直线型式, 我们称之为单列式发动机(或直列式发动机)。这种型式的发动机, 结构最为简单, 发动机只有一根曲轴, 曲轴上的每一个曲柄, 只传动一套活塞连杆组合。船用内燃机绝大部分都是单列式发动机, 特别在低速及中速发动机中。单列式发动机的横剖面结构线示图如图 1-2(a) 所示。

对单列式发动机来说, 当气缸数目增多时, 一般它的高度及宽度并不变化, 而仅是增加长度, 因而当缸数增加得太多时, 将使发动机机身的纵向刚性相对地下降, 从而易于产生咬缸等技术故障。另外缸数增多的结果, 相应地会增多曲柄数目, 降低曲轴的扭转刚性, 使曲轴的扭转振动的危险性增大, 因此目前的单列式发动机的气缸数目最多为 10~12 缸左右。

单列式发动机的机型无论对气缸直径大的(目前最大的达一米以上)或是小的, 都是适宜的, 因此它的功率范围很广, 可从 1 马力到 30000 马力以上。

2. 单轴多列式发动机

由于单列式发动机要受到气缸数目的限制(例如过去曾在航空发动机上, 由于受到长度的限制而不能在一直线上布置较多的气缸), 因此, 在不改变发动机的工作循环及气缸主要

结构参数（缸径及冲程）下，要想满足单机功率的进一步提高（即要增多缸数），只能寻求新的结构组成的道路，单轴多列式发动机就是在这种形势发展的要求下产生的。

单轴多列式发动机是在每一档曲柄上同时连接着两套以上活塞连杆组合的一种发动机型式；或者说是由两台以上的单列式发动机共用一根曲轴，而这些单列式发动机围绕着曲轴的中心线形成放射形的布置。随着多列式发动机列数的不同，而分别称为V型（即单轴双列式发动机），W型（单轴三列式）及X型（单轴四列式）发动机。当列数超过5时，由于结构上的考虑，气缸的排列大都采用在圆周上均匀分布的布置，因此往往统称为星型发动机。它们的横剖面结构线示图，见图1-2(b)、(c)、(d)及(e)所示。

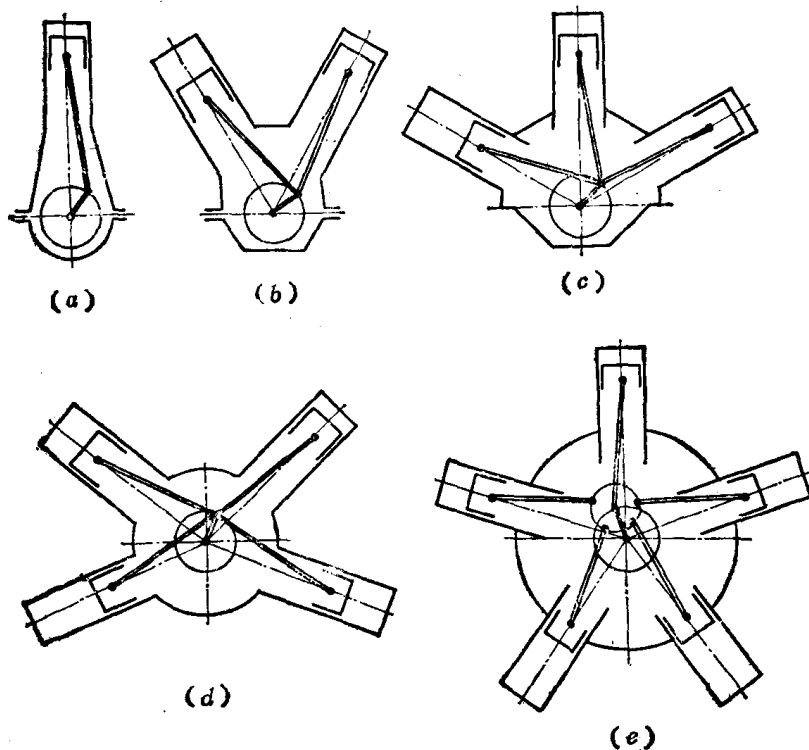


图 1-2

单轴多列式发动机除了由于人们追求单机功率的增长而被设计采用外，它本身还具有较为突出的优点：即这种型式的发动机有较轻的单位马力重量及较紧凑的外形尺寸。单就其中较简单的V型发动机来说，在缸径等结构参数及工作循环参数不变的情况下，相同功率的V型发动机与两台单列式发动机相比，前者重量较后者轻30%左右。因此单轴多列式发动机大多被作为强载度要求较高的军用舰艇、高功率机车等发动机的重要机型。

3. 单列对向活塞式发动机

这是一种由两套活塞机构的两个活塞在同一个气缸中组成对向运动而构成内燃机工作循环的内燃发动机。由于它没有专门的配气机构，换气是依靠对向运动的两个活塞分别控制气缸壁上的扫、排气口的开启时间来达到的，因而这种发动机只能以二冲程的工作原理来工作。

图1-3(a)是由两根曲轴分别带动上下两套活塞机构而组成的对向活塞式发动机，常称双轴对向活塞式发动机。图1-3(b)是由一根曲轴同时带动上下两套活塞机构的结构线示图。上方的活塞机构是由位于曲柄两侧的两个小曲柄（或者两个偏心轮子）通过长连杆及天平杆传动的，常称单轴对向活塞式发动机。它们的所有气缸沿曲轴成一直线布置，因此统称为单列对向活塞式发动机。

这种发动机的特点是单位气缸工作容积很大（其冲程近似为上下两套活塞机构冲程之和），因此单缸功率可达很大，如英国的低速大型单轴对向活塞式Doxford发动机，最大单

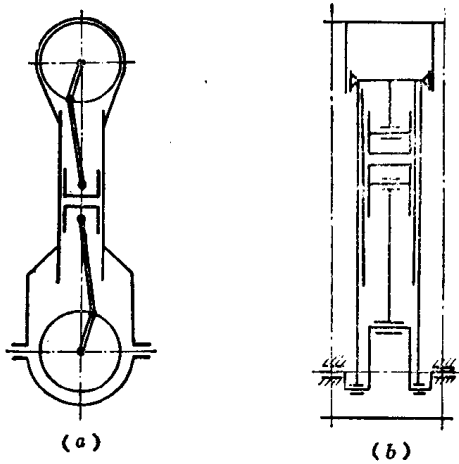


图 1-3

缸功率达到 3000 马以上。由于这种型式的发动机不存在气缸盖及复杂的气阀机构，因而工作可靠，维护保养简便。

4. 多轴对向活塞式发动机

这种发动机实质上是属于多轴多列式的发动机机型，但是由于它在结构上有它更加独特的地方，且以对向活塞的方式工作，故此处另列为一类以示区别。

多轴对向活塞式发动机是指发动机机体的横剖面呈多边形结构的发动机，其型式有三角形、四边形及六角形的等等。多边形发动机的每一根边线即为一个气缸的中心线，而在每两根边线的交点处，设有一根曲轴，因此在每一个曲柄上将同时带动两套活塞连杆组合。

图 1-4(a)、(b)及 (c) 即为这种型式发动机的横剖面结构线示图。

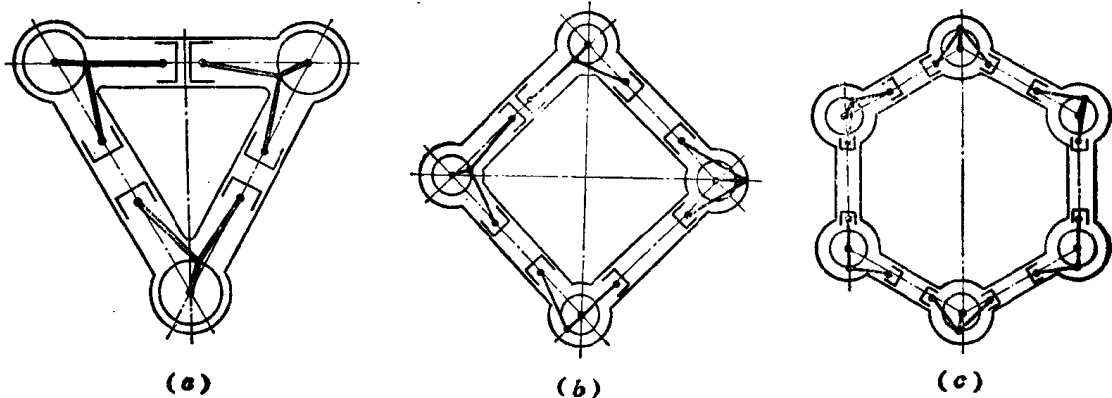


图 1-4

目前仅有三角形及四方形发动机获得了应用。特别是三角形发动机，例如英国 Napier 公司所造的 Deltic 发动机，由于它的重量尺寸很小，结构很紧凑，而被大量用于英国皇家海军的轻型沿海快艇上；近年来也开始在机车等方面获得了较多的采用。

六角形以上的多角形发动机由于它的结构复杂，造价高昂，加以结构不如三角形的紧凑，而未获得显著发展。

5. 多轴多列式发动机

凡是在多轴对向活塞式发动机类型以外的、具有两根以上曲轴并在每一横剖面内具有两个以上工作气缸的发动机，统称为“多轴多列式发动机”。由于这种发动机的型式较杂，不很规则，现通过若干实例加以说明。图 1-5(a) 所示为一双轴双列式发动机。它相当于两台单列式发动机组合在一起，形成有两个机身的式样，因此又常称双身发动机。图 1-5(b) 为一双轴四列式发动机。由于它的气缸中心线呈英文字母“H”的形式，因而常称为 H 型发动机。如果在 H 型发动机上再加一排气缸，则形成了“王”字型发动机，机上有三根曲轴、六列气缸。图 1-5(c) 为一双 V 型发动机。为了在单机功率上获得进一步提高，法国曾制成一台如图 1-5(d) 所示的机型。发动机上共有四根曲轴，六列气缸，单机功率达

到 30000 马力左右。但是目前除了双身发动机有一定发展外，由于结构上的特殊性与复杂性，其它型式至今尚未得到较大的发展。

综上所述，不难看出，各种特殊结构型式发动机的出现，其主要目的是集中解决如何提高单机功率以及如何满足某些特殊场合的特殊要求。例如要求重量轻、尺寸紧凑，或者

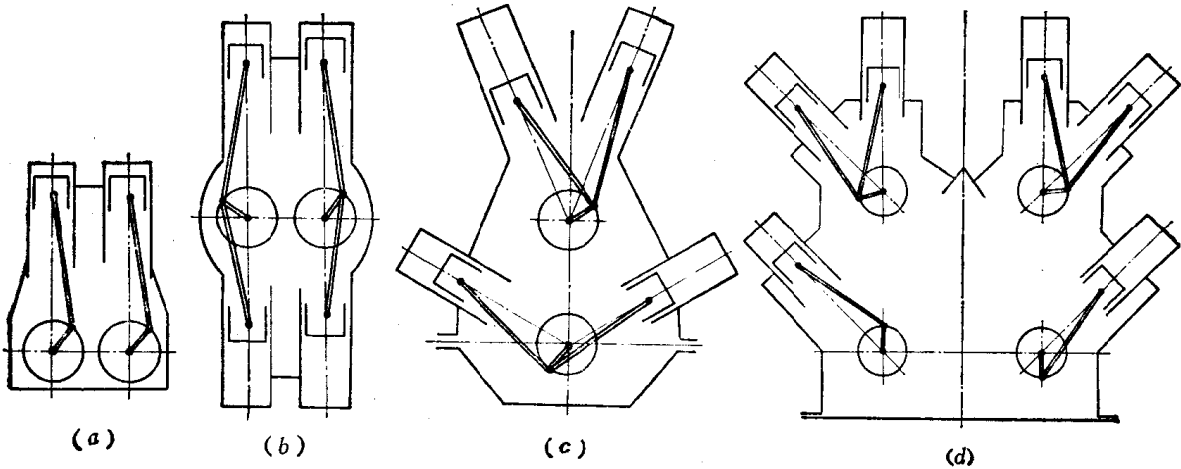


图 1-5

要求某些较为独特的外形，以适应装置布置的空间情况等等。而在实际中应用最多的仍然是那些结构形式最为简单的机型，因为它们能满足发动机的那些造价要低、制造工艺要简单、维护保养要方便等通常所规定的一般要求。

应该指出，以上的分类方法是不完善的，它的划分原则是以曲轴和每一横截面内的气缸数目以及某些常用但又较特殊的结构型式作为划分的界限。但是，对某些型式的发动机也会出现某些不适宜之处。例如对图 1-6 中所示发动机的若干型式就显得不适宜。这些发动机的共同特点是由两个以上的活塞组成一个单位气缸，但又与对向活塞式发动机不同。这种结构方案只在内燃机发展的早期被提出过，但由于结构上的以及气缸工作循环上的缺点而未获得发展，因此人们对此也不予重视。在对这些型式发动机进行归类时，主要的分歧是在于究竟是以活塞机构的多少及型式来划分？还是以气缸数目来划分的问题？由于这并不会太大地影响我们对这类发动机在动力学方面的研究，因而不一定作太死的规定，不过我们认为还是以活塞机构的数目及型式来进行归类，这对于动力学研究是比较有利的。

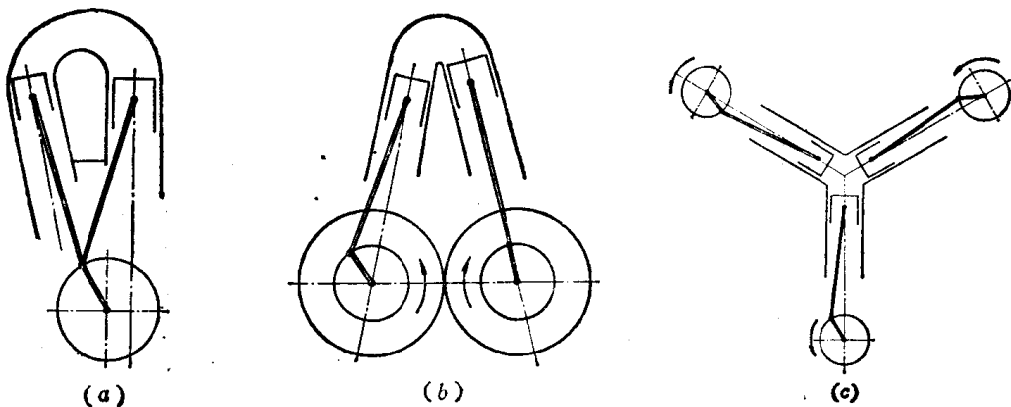


图 1-6

第二章 正置式活塞机构的运动学及动力学

§ 2-1 活塞的位移

图 2-1 是正置式活塞机构（活塞机构也常称曲柄连杆机构）的线示图。图中， B 点代表活塞（如果是十字头式发动机，它应该代表十字头）。它的位移从上止点量起为 x 。 BA 代表连杆，其长度为 L （小端中心到大端中心），它同气缸中心线所夹的角度为 β （称为连杆的摆动角）。 OA 代表曲柄，其长度为 R （即“曲柄半径”），它同气缸中心线所夹的角度为 α （称为“曲柄转角”）。为了统一以后在计算中的正负号及方向起见，我们规定曲柄是依顺时针方向回转，曲柄转角 α 从上死点起依顺时针方向量向曲柄，如图所示。从图中的几何关系可以得出：

$$x = L + R - R \cos \alpha - L \cos \beta \quad (2-1)$$

而
$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{R}{L} = \lambda \quad (2-2)$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \quad (2-3)$$

所以

$$x = R(1 - \cos \alpha) + L(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}) \quad (2-4)$$

这就是活塞位移的正确公式。

如果把公式(2-3)依照二项式定理展开则得：

$$\begin{aligned} \cos \beta &= (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \alpha \\ &\quad - \frac{1}{16} \lambda^6 \sin^6 \alpha - \dots \end{aligned} \quad (2-5)$$

由于 λ 是一个分数，在内燃发动机的情况下通常取 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ ，因此 λ^3 以上的数值都很小，可略去不计，公式(2-4)就可简化为：

$$x = R(1 - \cos \alpha) + L \times \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \alpha = R(1 - \cos \alpha) + \frac{R}{2} \lambda \sin^2 \alpha \quad (2-6)$$

或
$$x = R(1 - \cos \alpha) + \frac{R}{4} \lambda (1 - \cos 2\alpha) \quad (2-7)$$

(2-6)及(2-7)是活塞位移的近似公式。

活塞位移的公式还可用傅里叶级数的形式表示。如果将公式(2-5)中的许多高次 \sin 函数代以 α 倍角的 \cos 函数，即

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\alpha,$$

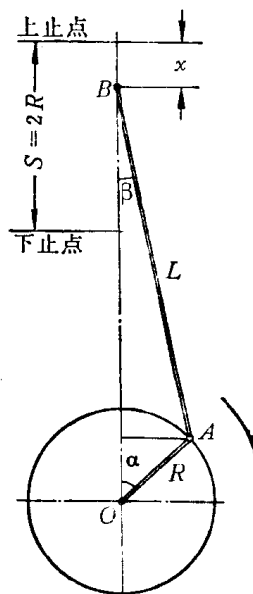


图2-1 活塞机构图

$$\sin^4 \alpha = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{8} \cos 4\alpha,$$

$$\sin^6 \alpha = \frac{5}{16} - \frac{15}{32} \cos 2\alpha + \frac{3}{16} \cos 4\alpha - \frac{1}{32} \cos 6\alpha,$$

.....

则得

$$\begin{aligned} \cos \beta = & \left(1 - \frac{1}{4} \lambda^2 - \frac{3}{64} \lambda^4 - \frac{5}{256} \lambda^6 \dots \right) \\ & + \left(\frac{1}{4} \lambda^2 + \frac{1}{16} \lambda^4 + \frac{15}{512} \lambda^6 + \dots \right) \cos 2\alpha \\ & - \left(\frac{1}{64} \lambda^4 + \frac{3}{256} \lambda^6 + \dots \right) \cos 4\alpha + \left(\frac{1}{512} \lambda^6 + \dots \right) \cos 6\alpha - \dots \end{aligned}$$

将其代入公式(2-4)可得

$$\begin{aligned} x = & R - R \cos \alpha + L - L \left[\left(1 - \frac{1}{4} \lambda^2 - \frac{3}{64} \lambda^4 - \frac{5}{256} \lambda^6 - \dots \right) \right. \\ & + \left(\frac{1}{4} \lambda^2 + \frac{1}{16} \lambda^4 + \frac{15}{512} \lambda^6 + \dots \right) \cos 2\alpha - \left(\frac{1}{64} \lambda^4 + \frac{3}{256} \lambda^6 + \dots \right) \cos 4\alpha \\ & \left. + \left(\frac{1}{512} \lambda^6 + \dots \right) \cos 6\alpha + \dots \right] \end{aligned}$$

$$\text{或} \quad x = R(a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha + a_3 \cos 3\alpha + a_4 \cos 4\alpha + \dots) \quad (2-8)$$

这就是活塞位移的傅里叶级数公式。

式中:

$$\begin{aligned} a_0 = & \frac{1}{R} \left[L + R - L \left(1 - \frac{1}{4} \lambda^2 - \frac{3}{64} \lambda^4 - \frac{5}{256} \lambda^6 \dots \right) \right] \\ = & 1 + \frac{1}{4} \lambda + \frac{3}{64} \lambda^3 + \frac{5}{256} \lambda^5 + \dots \\ a_1 = & -1 \\ a_2 = & - \left(\frac{1}{4} \lambda + \frac{1}{16} \lambda^3 + \frac{15}{512} \lambda^5 + \frac{35}{2048} \lambda^7 + \dots \right) \\ a_3 = & 0 \\ a_4 = & + \left(\frac{1}{64} \lambda^3 + \frac{3}{256} \lambda^5 + \frac{35}{4096} \lambda^7 + \dots \right) \\ a_5 = & 0 \\ a_6 = & - \left(\frac{1}{512} \lambda^5 + \frac{5}{2048} \lambda^7 + \dots \right) \\ & \dots \end{aligned} \quad (2-9)$$

从公式(2-8)中可以看出,除了 $a_1 \cos \alpha$ 之外,其他 \cos 单数倍 α 的各项都不存在,因此,活塞位移的傅里叶级数公式的实际形式为

$$x = R(a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha + a_4 \cos 4\alpha + \dots) \quad (2-10)$$

如果我们略去各系数 a 中 λ^3 以上的各项, 即取

$$\left. \begin{aligned} a_0 &\approx 1 + \frac{1}{4} \lambda \\ a_1 &= -1 \\ a_2 &\approx -\left(-\frac{1}{4} \lambda\right) \end{aligned} \right\}$$

则所得结果与公式(2-7)相同。

活塞位移的曲线 $x = f(\alpha)$ 可以用机械原理中的一些作图法画出, 也可用作表的方法来画。下面先介绍作表的方法。

在作 $x = f(\alpha)$ 曲线的时候, 主要是要找出活塞位移和其冲程的相对值, 即 $\frac{x}{2R}$, 也就是说, 如果已知 α , 也就可以知道活塞所走过的百分之几的冲程, 因此, 公式(2-7)又可改写成

$$\frac{x}{2R} = \frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{8}(1 - \cos 2\alpha) \quad (2-11)$$

上式右端给出的数值称为活塞的位移系数。计算活塞位移系数可以用表 2-1 的格式。

表 2-1

$\frac{x}{2R} = \frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{8}(1 - \cos 2\alpha) \quad \lambda =$							
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
α	$\cos \alpha$	$1 - \cos \alpha$	$\cos 2\alpha$	$1 - \cos 2\alpha$	$\frac{\lambda}{4} \times \textcircled{5}$	$\textcircled{3} + \textcircled{6}$	$\frac{1}{2} \times \textcircled{7}$
0°							
10°							
20°							
⋮							
⋮							

船用发动机的 λ 值一般取在 $\frac{1}{3.2}$ 到 $\frac{1}{5}$ 范围。表(2-3)中列出了若干活塞位移的系数。

表2-2 动力计算用三角函数值表

α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\sin 2\alpha$	$\cos 2\alpha$	$1 - \cos \alpha$	$1 - \cos 2\alpha$	$\sin^2 \alpha$
0°	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5°	0.08716	0.99619	0.17365	0.98481	0.00381	0.01519	0.00760
10°	0.17365	0.98481	0.34202	0.93969	0.01519	0.06031	0.03015
15°	0.25882	0.96593	0.50000	0.86603	0.03407	0.13397	0.06699
20°	0.34202	0.93969	0.64279	0.76604	0.06031	0.23396	0.11698
25°	0.42262	0.90631	0.76604	0.64279	0.09369	0.35721	0.17861
30°	0.50000	0.86603	0.86603	0.50000	0.13397	0.50000	0.25000
35°	0.57358	0.81915	0.93969	0.34202	0.18085	0.65798	0.32899
40°	0.64279	0.76604	0.98481	0.17365	0.23396	0.82635	0.41318
45°	0.70711	0.70711	1.00000	0.00000	0.29289	1.00000	0.50000
50°	0.76604	0.64279	0.98481	-0.17365	0.35721	1.17365	0.58682
55°	0.81915	0.57358	0.93969	-0.34202	0.42642	1.34202	0.67101
60°	0.86603	0.50000	0.86603	-0.50000	0.50000	1.50000	0.75000
65°	0.90631	0.42262	0.76604	-0.64279	0.57738	1.64279	0.82139
70°	0.93969	0.34202	0.64279	-0.76604	0.65798	1.76604	0.88302

α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\sin 2\alpha$	$\cos 2\alpha$	$1 - \cos \alpha$	$1 - \cos 2\alpha$	$\sin^2 \alpha$
75°	0.96593	0.25882	0.50000	-0.86603	0.74118	1.86603	0.93301
80°	0.98481	0.17365	0.34202	-0.93969	0.82635	1.93969	0.96985
85°	0.99619	0.08716	0.17365	-0.98481	0.91284	1.98481	0.99240
90°	1.00000	0.00000	0.00000	-1.00000	1.00000	2.00000	1.00000
95°	0.99619	-0.08716	-0.17365	-0.98481	1.08716	1.98481	0.99240
100°	0.98481	-0.17365	-0.34202	-0.93969	1.17365	1.93969	0.96985
105°	0.96593	-0.25882	-0.50000	-0.86603	1.25882	1.86603	0.93301
110°	0.93969	-0.34202	-0.64279	-0.76604	1.34202	1.76604	0.88302
115°	0.90631	-0.42262	-0.76604	-0.64279	1.42262	1.64279	0.82139
120°	0.86603	-0.50000	-0.86603	-0.50000	1.50000	1.50000	0.75000
125°	0.81915	-0.57358	-0.93969	-0.34202	1.57358	1.34202	0.67101
130°	0.76604	-0.64279	-0.98481	-0.17365	1.64279	1.17365	0.58682
135°	0.70711	-0.70711	-1.00000	-0.00000	1.70711	1.00000	0.50000
140°	0.64279	-0.76604	-0.98481	0.17365	1.76604	0.82635	0.41318
145°	0.57358	-0.81915	-0.93969	0.34202	1.81915	0.65798	0.32899
150°	0.50000	-0.86603	-0.86603	0.50000	1.86603	0.50000	0.25000
155°	0.42262	-0.90631	-0.76604	0.64279	1.90631	0.35721	0.17861
160°	0.34202	-0.93969	-0.64279	0.76604	1.93969	0.23396	0.11698
165°	0.25882	-0.96593	-0.50000	0.86603	1.96593	0.13397	0.06699
170°	0.17365	-0.98481	-0.34202	0.93969	1.98481	0.06031	0.03015
175°	0.08716	-0.99619	-0.17365	0.98481	1.99619	0.01519	0.00760
180°	0.00000	-1.00000	-0.00000	1.00000	2.00000	0.00000	0.00000
185°	-0.08716	-0.99619	0.17365	0.98481	1.99619	0.01519	0.00760
190°	-0.17365	-0.98481	0.34202	0.93969	1.98481	0.06031	0.03015
195°	-0.25882	-0.96593	0.50000	0.86603	1.96593	0.13397	0.06699
200°	-0.34202	-0.93969	0.64279	0.76604	1.93969	0.23396	0.11698
205°	-0.42262	-0.90631	0.76604	0.64279	1.90631	0.35721	0.17861
210°	-0.50000	-0.86603	0.86603	0.50000	1.86603	0.50000	0.25000
215°	-0.57358	-0.81915	0.93969	0.34202	1.81915	0.65798	0.32899
220°	-0.64279	-0.76604	0.98481	0.17365	1.76604	0.82635	0.41318
225°	-0.70711	-0.70711	1.00000	0.00000	1.70711	1.00000	0.50000
230°	-0.76604	-0.64279	0.98481	-0.17365	1.64279	1.17365	0.58682
235°	-0.81915	-0.57358	0.93969	-0.34202	1.57358	1.34202	0.67101
240°	-0.86603	-0.50000	0.86603	-0.50000	1.50000	1.50000	0.75000
245°	-0.90631	-0.42262	0.76604	-0.64279	1.42262	1.64279	0.82139
250°	-0.93969	-0.34202	0.64279	-0.76604	1.34202	1.76604	0.88302
255°	-0.96593	-0.25882	0.50000	-0.86603	1.25882	1.86603	0.93301
260°	-0.98481	-0.17365	0.34202	-0.93969	1.17365	1.93969	0.96985
265°	-0.99619	-0.08716	0.17365	-0.98481	1.08716	1.98481	0.99240
270°	-1.00000	-0.00000	0.00000	-1.00000	1.00000	2.00000	1.00000
275°	-0.99619	0.08716	-0.17365	-0.98481	0.91284	1.98481	0.99240
280°	-0.98481	0.17365	-0.34202	-0.93969	0.82635	1.93969	0.96985
285°	-0.96593	0.25882	-0.50000	-0.86603	0.74118	1.86603	0.93301
290°	-0.93969	0.34202	-0.64279	-0.76604	0.65798	1.76604	0.88302
295°	-0.90631	0.42262	-0.76604	-0.64279	0.57738	1.64279	0.82139
300°	-0.86603	0.50000	-0.86603	-0.50000	0.50000	1.50000	0.75000
305°	-0.81915	0.57358	-0.93969	-0.34202	0.42642	1.34202	0.67101
310°	-0.76604	0.64279	-0.98481	-0.17365	0.35721	1.17365	0.58682
315°	-0.70711	0.70711	-1.00000	-0.00000	0.29289	1.00000	0.50000
320°	-0.64279	0.76604	-0.98481	0.17365	0.23396	0.82635	0.41318
325°	-0.57358	0.81915	-0.93969	0.34202	0.18085	0.65798	0.32899
330°	-0.50000	0.86603	-0.86603	0.50000	0.13397	0.50000	0.25000
335°	-0.42262	0.90631	-0.76604	0.64279	0.09369	0.35721	0.17861
340°	-0.34202	0.93969	-0.64279	0.76604	0.06031	0.23396	0.11698
345°	-0.25882	0.96593	-0.50000	0.86603	0.03407	0.13397	0.06699
350°	-0.17365	0.98481	-0.34202	0.93969	0.01519	0.06031	0.03015
355°	-0.08716	0.99619	-0.17365	0.98481	0.00381	0.01519	0.00760
360°	-0.00000	1.00000	-0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000

当连杆的长度 L 为 ∞ 时, $\lambda = \frac{1}{\infty} = 0$ 。活塞位移公式则与简谐运动位移公式相同,

即

$$x = R(1 - \cos \alpha)。$$

图 2-2 示出 $\lambda = \frac{1}{3.5}$ 、 $\frac{1}{4}$ 及 $\frac{1}{5}$ 时的三种活塞位移系数曲线 $\frac{x}{2R} = f(\alpha)$ 。细线代表 $\lambda = \frac{1}{\infty} = 0$ 的简谐运动曲线。可以看出, 由于连杆长度不等于 ∞ , 当曲柄角还在 90° 以前时, 活塞即已行至其冲程的一半, 连杆愈短, 则到得愈早。

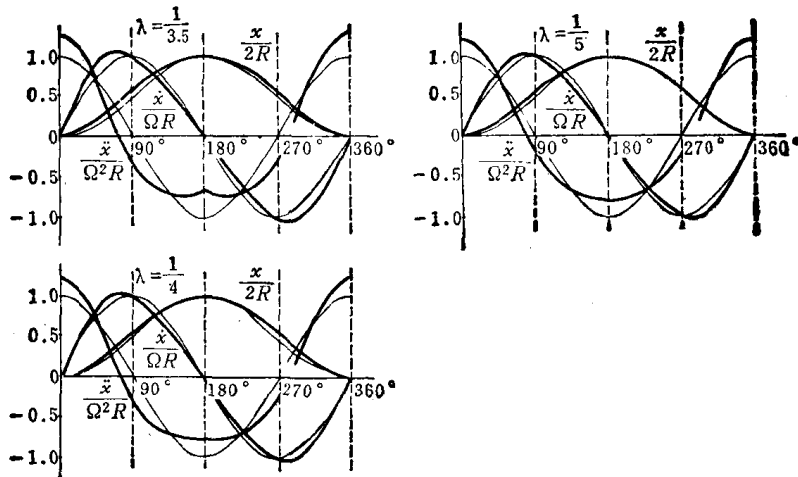


图 2-2

下面讨论表示活塞位移与角度之间关系的作图方法。

上面已经提到, 当连杆的长度为 ∞ 时 ($\lambda = \frac{1}{\infty} = 0$), 则活塞位移公式与简谐运动位移

公式相同, 即

$$x = R(1 - \cos \alpha)。$$

如果取 R 为半径作圆如图 2-3, 则当 OA 转过 α 角时, A 点转至 A' , 由 A 点到 A' 点在 OA 轴上的投影 B 点的距离 AB , 即得活塞运动的距离, 而

$$AB = OA - OB = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha)$$

与以上公式恰好相同, 这说明只要应用以上作图方法就可以很简易地得到在任意 α 角时的 x 值, 这对于以后的应用是很方便的。

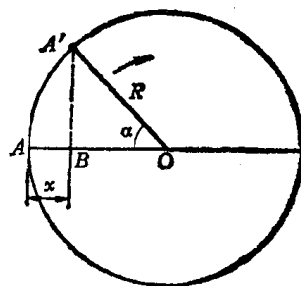


图 2-3

但是对实际应用的发动机, 要其连杆为无限长是不可能的, 这样就需要采取比较近似的方法来校正由于连杆不是无限长而产生的偏差。最常用也比较最简便的近似法是勃利克斯作图法, 其作法如下:

设发动机曲柄半径为 R 及 $\frac{R}{L} = \lambda$ 。以 R 为半径作圆 (见图 2-4)。然后在圆心 O 处向右量 $\frac{R\lambda}{2}$ 得 O' (O' 的位置应由曲柄中心 O 点起向下死点量)。以 O' 为中心向圆周作 $O'A''$, 它与气缸中心线 OA 的夹角为 α , 自 A 点到 A'' 点在 OA 轴上的投影 B 点的距离 x 即为活塞在 α 角时的活塞位移值。