

# 旋 转 活 塞 发 动 机

中国科学院力学研究所 编译  
《转子发动机组》

## 内 容 简 介

本书系根据 1965 年英国出版的 Felix Wankel 所著英译本 «Rotary Piston Machines» (原版是德文) 以及 1968 年英国出版的 R. F. Ansdale 所著 «The Wankel RC Engine (Design and Performance)» 两书编译而成, 其内容共分两部分。第一部分叙述旋转活塞机的分类, 对各种旋转活塞机的机型作了分析与评价, 并附有详细的分类图表。第二部分对三角活塞旋转式发动机作了一般性的介绍, 讨论了它在发展中的一些问题, 其中包括它的基本关系、密封、进气、润滑、冷却、点火以及工作特性等方面。

本书可供从事研究和生产旋转活塞发动机的工人、科研人员以及技术人员参考。

## 旋 转 活 塞 发 动 机

中国科学院力学研究所 编译  
«转子发动机组»

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1973 年 8 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/16  
1973 年 8 月 第 一 次 印 刷 印张: 8 3/4 插页: 8  
印数: 0001—38,600 字数: 202,000

统一书号: 15031·58

本社书号: 172·15—3

定 价: 1.70 元

# 目 录

## 第一部分 旋转活塞机的分类

第一章 活塞机	1
1.1 零部件的定义	1
1.2 作往复或单向运动的功率输出件	1
1.3 往复活塞和旋转活塞机的类型	2
第二章 旋转活塞机的分类	3
2.1 旋转轴的相对位置	3
2.2 啮合(或工作室组成件间的相对运动)的方式	4
2.3 机型的类型和型式	4
2.4 曲线生成点和密封元件的位置	5
2.5 相对转速(或速比)的标记	6
2.6 工作室的组成	6
第三章 旋转活塞机机型的探讨	7
3.1 往复啮合	7
3.2 拱弧啮合	7
3.3 交衔啮合	8
3.4 滑移啮合	11
3.5 反向啮合	11
3.6 往复和滑移啮合	12
3.7 滑移和反向啮合	12
3.8 附加的旋转和圆周运动	13
第四章 转动活塞机	14
4.1 圆的外形	14
4.2 往复啮合	15
4.3 交衔啮合	15
4.4 滑移啮合	15
4.5 往复啮合和类似于滑移啮合的啮合	16
4.6 拱弧啮合	16
4.7 中轴式转动活塞机	17
4.8 摆动式活塞或密封部件的拱弧啮合	17
4.9 类似于交衔啮合的啮合和摆动式活塞或密封部件	17
4.10 由分类表第 VI-XII 行啮合方式导出的混合啮合方式	18
第五章 滚动活塞机	19
第六章 旋转活塞机的分类图表和总结	21
6.1 图表	21
6.2 总结	21

## 第二部分 三角活塞旋转式发动机

第七章	旋转活塞内燃机的若干基本特点	23
第八章	外旋轮线	30
8.1	长短幅外旋轮线的推导	30
8.2	如何求得活塞周面曲线	34
8.3	其它结构的优点或缺点	36
第九章	第一台单纯旋转型三角活塞旋转式发动机	41
第十章	行星旋转式发动机	45
第十一章	三角活塞旋转式发动机的基本关系	52
11.1	基本关系	52
11.2	西瓦茨提出的排量算法	55
11.3	压缩比的计算	58
11.4	排量及相应的容积排量	59
11.5	面积/容积比	66
第十二章	密封	71
12.1	油封装置	71
12.2	气封	72
12.3	端面密封	77
12.4	径向密封片	78
第十三章	进气——端面和周边进气及其优点,气流速度和容积效率	82
第十四章	润滑	91
第十五章	冷却	94
15.1	引言	94
15.2	空气冷却	96
15.3	液体冷却	97
第十六章	点火	100
第十七章	功率输出	104
第十八章	工作特性	107
18.1	对燃料的要求	107
18.2	发动机的噪声和振动	107
18.3	废气污染	108
18.4	性能	110
18.5	燃油消耗量	113
18.6	燃油喷射	113
附录	三角活塞旋转式发动机的数学分析	115

# 第一部分 旋转活塞机的分类

## 第一章 活 塞 机

### 1.1 零部件的定义

活塞机是一种机械,如发动机、泵、鼓风机和压气机,它有一个由整体壁面包围,盛着液态或气态工作介质的工作室。工作室的容积在保持良好的密封条件下,由一部分壁面对其余壁面作相对运动来变化。将能量传递给工作介质或从工作介质获得能量的工作部件叫做活塞。这是沿用往复式发动机上的习惯称呼。旋转机械中的活塞有时称为转子或旋转活塞。

为了使活塞机能够平衡,工作部件能运行无阻,不属于工作部件的工作室壁,也可以对活塞或转子作相对运动。这种部件称为密封部件。密封部件虽然承受工作介质的压力,但不产生扭矩。

在第六章中的彩色机型和型式图中,具有不同功能的零部件都用不同的颜色加以区别:功率传递部件用红色,密封部件用蓝色,壳体等静止部件用黑色。在一部分活塞机中,输出和密封由两个部件来交替完成,这些部件用紫色来表示,因紫色是蓝和红色的混合色。输出轴或曲轴用黄色。密封元件用绿色。运动部件的重心如固定 in 一点,或装在固定轴承上的轴的中心,用一个白点来表示。运动部件作轨道运行的中心或曲柄销和偏心块的中心,根据啮合部件(输出或密封件)所规定的颜色分别用蓝、红或紫色。

### 1.2 作往复或单向运动的功率输出件

根据功率输出件的重心运动情况和工作室的容积变化方式,可将活塞机分为往复式和单向式两大类。

第一类包括各种往复活塞机,它们的功率输出件(活塞)的重心沿直线作往复运动,或在气缸围绕一固定中心旋转的情况下,沿圆弧作往复运动。在摆动式活塞装置上,活塞重心沿圆弧摆动,或活塞围绕其自身的重心摆动。

第二类包括各种旋转活塞机,它们的功率输出件(活塞)的重心以均匀或不均匀的速度沿圆形或其他形状的封闭轨道作单向运动。功率部件(活塞)也可以均匀或不均匀的速度围绕其自身的重心旋转。

### 1.3 往复活塞和旋轉活塞机的类型

往复活塞机的工作室容积可用下列的方式来改变:

(1a) 活塞可在静止的气缸内作直线运动。或气缸顺着静止的活塞运动。

气缸上通常有一个气缸盖或气缸头,但在适当的情况下,也可用滑动或旋转阀来代替。此外也有用第二个活塞来代替气缸头或关闭阀的,例如在有些对置式活塞机上就是这样。

(1b) 排列适当的气缸也可作往复运动——例如有些摆动气缸式蒸汽机——或使气缸套筒作往复或旋转运动用来开启和关闭进排气口——例如套筒式发动机。

(2) 摆动活塞,虽然热力机上已不使用,但在有些场合可能还要使用;这种装置的圆弧形气缸具有圆形或方形内截面,活塞沿着摆动。利用螺纹使活塞作往复运动。

将一个功率部件,也就是说,工作室的工作部件(活塞),连接到其它运动部件的方式并不很多。在没有旋转功率输出件的旧式往复活塞机上,通常用链或连杆将活塞连接到一根横杆上。在有旋转输出轴的往复活塞机上,连杆可以直接连接到曲轴上,也可以通过一横杆,直角杠杆或变向机构间接连接到曲轴上。也有将往复活塞直接或通过中间滚轮来推动凸轮的,但这种例子很少。此外,还有使活塞直接将能量传递给另一工作介质的自由活塞发动机。

人们熟知的几种往复活塞发动机——直列式、V形式、水平对置式、星形排列式等——都是属于活塞作直线运动这一类的。

## 第二章 旋转活塞机的分类

根据运动部件重心的运动方式,可以将旋转活塞机分为三种类型:单纯旋转机、行星旋转机和转动活塞机。

单纯旋转机的所有运动部件都以等角速度围绕其自身的重心旋转。这类旋转活塞机能够达到完全平衡,所以轴承不受动力负荷,因而特别适用于极高的转速。

行星旋转机的所有运动部件都以等角速度运转,但至少有一个运动部件,象行星一样,围绕一固定点沿圆形或近似圆形的轨道运转,同时也围绕其自身的重心旋转。当然,这两种转动都各自以等角速度进行的。在轨道上运转的部件虽然可以做到完全平衡,但其质量在运转时所产生的作用力必然会影响到一个或多个轴承的负荷。

能不能将这种类型的旋转活塞机应用于中速或高速,完全视轴承能不能负担不可避免的离心力而定。

转动活塞机可以分为两类。一类的特征和单纯旋转活塞机的相似,称为单纯型转动活塞机;另一类的特征和行星旋转活塞机的相似,称为行星型转动活塞机。单纯型旋转活塞机的功率输出部件(活塞或转子)能以可变角速度旋转,行星型转动活塞机的功率输出件则能以可变角速度沿轨道运转。转动活塞机的功率输出件可以只具有一种运转方式,也可以同时以可变角速度围绕其自身的重心旋转。假使功率输出件以等角速度运转,则工作室组成件中至少有另一个是以可变角速度运转,或以可变角速度沿轨道运转或作往复运动。

这种类型的旋转活塞机只适用于低速或中速。

### 2.1 旋转轴的相对位置

旋转活塞机又可按照其旋转轴的相对位置分为三大类:

1. 属于平行轴式的旋转活塞机,轴和轴之间,象一对啮合的正齿轮一样,有一定的距离。平行外轴式旋转活塞机的轴装置和一对正外齿轮的轴相似,而平行内轴式旋转活塞机的轴装置则好象一个正外齿轮和一个与之啮合的环形内齿轮的轴一样。特殊情况是两轴重合的中轴式机。一台旋转活塞机也可能包括几种不同的轴装置,例如既有平行外轴又有平行内轴。旋转活塞机的工作室组成件,可以象正齿轮、斜齿轮或螺旋齿轮一样地啮合或作相对运动。

2. 在另一类的旋转活塞机中,轴与轴的方向是不一致的。象一对伞齿轮一样,两轴之间有一角度。这类斜轴式的旋转活塞机可分为内轴式和外轴式、工作室的组成件,可以象正、斜或螺旋齿轮组合一样作相对运动,以改变工作室的容积。

3. 交叉轴式的旋转活塞机的轴是相交叉的,其装置如同斜齿轮或螺旋齿轮组合的轴一样。这类旋转活塞机也可分为外轴式和内轴式。

## 2.2 啮合(或工作室組成件間的相对运动)的方式

上述平行轴式旋转活塞机的可变容积工作室,可由五种简单的和几种复杂的方式组成。

容积变化可由交衔啮合按照啮合齿轮的规律和比例来实现。这样,在采用这种啮合方式的内轴式机上,外面转速较低的转子至少应比里面转速较高的部件多一个齿。工作室的组成件也可以通过一些轴和外齿轮使之联接起来,因而上述齿轮规律不能应用。这是另一种啮合方式。具有这种啮合方式的旋转活塞机的转子有时是作反比例旋转的。例如,内轴式机的外转子可以比尺寸较小的内转子转得快,也就是说,环形齿轮可比内齿轮少一个齿或凸叶。这里所提到的“齿”或“凸叶”含义比较广,包括角、突起、扇形、渐伸线和其他齿形。这一种啮合方式称为滑移啮合。在第六章中,表 2 第 III 和 IV 列示出了这两种啮合方式的例子,但有时轴也可以由相等直径和相等齿数的齿轮来联接,在这种情况下,需要留意的是内外部件的转速可能颠倒。

机械原理书中常将各种齿面和啮合面的啮合统称为“交衔啮合”,没有将“交衔啮合”和“滑移啮合”加以区别。实际上,交衔啮合主要是用于一般工程上的功率传递。滑移啮合因为有效直径、速比和齿数间的关系不同,特别适用于组成可变容积工作室,对功率传递则应用不上,或者多少带有困难。由此可知,“交衔”与“滑移”啮合之间是有区别的。

可变容积工作室的组合部件也可用 1:1 速比沿着平行的圆弧来啮合。这种啮合方式称为拱弧啮合。

内轴式机上所用的拱弧啮合(速比为 1:1)是用来代替在这种场合无法应用的交衔或滑移啮合。拱弧啮合的转子,不但相对速度而且旋转方向都可能和一对啮合齿轮不一样。另一个与此相似的例子是,组成外轴式机可变容积工作室的两个转子,通过三个外齿轮来联接,转子在它们的接触点上的旋转方向相反。但这两个转子本身的旋转方向是相同的,和一对啮合正齿轮正相反。这个例子代表了反向啮合。

另一种旋转活塞机的啮合方式是大家熟悉的往复啮合。

第六章的表 1 到表 6,有助于对上述各种啮合方式的了解。表 1 给出各种啮合方式的定义。表 2 到表 6 用图解说明了各种啮合的原理。

表 2 到表 6 中的每一个机型图所示的机型只是属于此机型的一种型式,用来表示机型的齿轮装置,箭头代表旋转方向。

如果两个部件,它们的中心至少有一个是运动的,而又不持续地相合在一点,则这两个部件产生啮合。如果两个中心持续地相合在一点,则产生包络。

这些机型图中的曲柄和啮合部件的剖面不一定在一个平面上,要看各个设计而定。

就内轴式机而言,两个部件的啮合点总是在它们最靠近,即啮合最深的地方,这时它们所组成的工作室容积也是最小。

## 2.3 机型的类型和型式

旋转活塞机可以按照其主要部件重心的特性、旋转轴的相对位置和啮合方式来归入第六章



表 7 到表 10 所示的四种类型:

表 7: 内轴和外轴式单纯旋转机。

表 8: 内轴和外轴式行星旋转机。

表 9: 内轴、外轴和中轴式单纯型转动活塞机。

表 10: 内轴和外轴式行星型转动活塞机。

上面四张表中的每一格代表一种机型,机型图只代表这种机型的一种型式。

第六章中还附有若干补充型式图,用来列出属于每一种机型的已有型式(见表 11 到表 26)。

从分类表上可以发现,每一个旋转机——具有任何固定的速比——可以采用在所属的单纯旋转、行星旋转、单纯型转动活塞或行星型转动活塞类型范围内两种基本上相似的机型中的一种(见表 7 到表 10)。但内轴式行星旋转机可以采用的则不少于四种(见表 8 和 10),可根据它们如下的功率部件(活塞或转子)形状和安装方式来区别:

伸入\*式内功率传递部件,

伸入式外功率传递部件,

接受式内功率传递部件,

接受式外功率传递部件。

参考表 8 第 I 行第 1、2、3 和 4 列的各行星旋转机型有助于了解上述区别。这几个机型属于行星旋转类型,但采取了往复啮合方式,因而具有普通活塞和气缸的形式。

第 I 行第 1 列所示机型(下面用 I/1, I/2 代表第 I 行第 1 列,第 I 行第 2 列,余类推)是帕森斯所发明,图中为了简单起见,只画单缸,实际上是四缸。这种机型不可和属于行星型转动活塞类型(见表 10 I/1)的罗尼小神的星形旋转活塞发动机相混淆。表 8 I/1 机型具有一伸入式内功率部件(活塞), I/4 机型具有一伸入式外功率部件, I/3 机型具有一接受式内功率部件,而 I/2 机型则具有一接受式外功率部件。

如同表所示,采用拱弧啮合的机型也可以有上述四种变换形式。

II/7 和 II/6 机型分别具有伸入式外和内功率部件,而 II/5 和 II/8 则具有接受式内和外功率部件。对于其他行星旋转机型,则区别这四种变换并不这样容易。但是, III/5—8、IV/5—8 和 III/13—16 各种机型的这四种变换都是可以得到的。表 8 所示的行星旋转机型,如果工作室只由两个运动部件组成,显然都可以有这样四种功率部件的变换。但假使工作室是由三个运动部件组成,那就只有两种可能的变换。

## 2.4 曲线创成点和密封元件的位置

在 2.3 节中讲到的每一种旋转活塞机型的基本结构是与曲线创成点和密封元件的位置有关的。因此,有两种曲线创成点和密封元件布置部位不同的旋转活塞机须用符号来加以区别,一种是曲线创成点和密封元件附属于内转子或内部件的旋转活塞机,可用符号(内)来标明,另一种旋转活塞机的曲线创成点和密封元件则安装在外件上,可用符号(外)来标明。符号是加在啮合方

\* 伸入是啮合的方式之一。

式后面。

例如表 7 III/1 所示的交衔啮合单纯旋转机型,密封元件装在外件上,应写为交衔啮合(外)单纯旋转机;III/2 所示的交衔啮合单纯旋转机型,密封元件装在内件上,应写为交衔啮合(内)单纯旋转机。表 8 III/5,6 所示的行星旋转机型用交衔啮合,密封元件在内转子上,这类机型应写为交衔啮合(内)行星旋转机,而 III/7,8 所示机型也属于交衔啮合,但密封元件在外件上,因此应写为交衔啮合(外)行星旋转机。

## 2.5 相对转速(或速比)的标记

标记内轴式单纯旋转机的转速比,先写里面较小转子的转速,后写和它啮合的外面较大转子的转速。因此,交衔啮合内轴式机速比的第一个数字总是较大,例如 2:1,3:2 等。滑移啮合内轴式机速比的第一个数字总是较小,例如 1:2,2:3 等。

行星旋转机的速比可用同样的方式来标记。即使两个相啮合的转子中的一个静止的也是如此。在这种情况下,可以假设静止转子的转速已转移到曲轴上。

外轴式单纯和行星旋转机的速比标记方式也一样;先写较小转子的转速,包括一个啮合件是静止的特殊情况。

## 2.6 工作室的组成

除了重心运动、啮合方式、旋转轴位置和曲线生成点部位之外,还需要考虑到工作室是怎样组成的。可变容积室的组成方式基本上有四种:

- 1) 仅有啮合(运动)件。
- 2) 至少有一个啮合(运动)件和一个组成外工作室壁的静止件。
- 3) 至少有一个啮合件和一个组成内工作室壁的静止件。
- 4) 至少有一个啮合件和一个组成外工作室壁一个组成内工作室壁的静止件。

从分类表中可以看出,将 2) 和 3) 合并为一项,似更合适。这样,旋转活塞机的工作室共有三种不同的组成方式。

## 第三章 旋转活塞机机型的探讨

各种旋转活塞机,包括发动机、泵、鼓风机和压气机,将在本章内,根据已有的机型,详加研讨。

### 3.1 往复啮合

采用往复啮合的内轴式行星旋转机见表 8 第 I 行第 1—4 列 (I/1—4)。属于 I/1 机型的旋转活塞机,重心都是以等角速度沿圆弧轨道运行,活塞围绕其自身的重心旋转,而气缸也以等速围绕其自身静止的重心旋转。机型图所示的旋转活塞机只有一个活塞,可用平衡块使其重心与曲柄销的中心相重合。用两个活塞对置两端,如型式图表 11 中所示,当然更好。帕森斯曾发明这种用两个活塞的蒸汽机。有几台帕森斯蒸汽机曾用在船上以传动发电机。据报道,这种蒸汽机没有震动。但相对于工作室来讲,总体尺寸很大,这是最大的缺点。此外,它的蒸汽进出是靠一块静止的圆盘形阀来控制的。汽缸在旋转时扫过圆盘形阀上的孔隙,进排气口随之开启或关闭。由于当时缺少关于密封圆盘形阀方面的知识,估计这种装置产生了相当严重的漏气或摩擦损失。

在帕森斯蒸汽机之前,还有威蒂蒸汽机(1811 年),见表 11 第 3 行。威蒂蒸汽机用一个耳轴,亦即具有一支承块和一静止销的所谓苏格兰铀来代替曲柄。表 11 第 2 行所示的安特鲁船用蒸汽机(1858 年)也是属于这种机型。这台蒸汽机没有曲柄,用一块旋轮线形状的凸轮板以 1:2 的速比使活塞作正确的运动。也有用同样原理设计的内燃机,例如布赫勒发动机。

汪克尔 1929 年设计的外轴式往复活塞机的机型图列于表 8 I/11 内。活塞和气缸作平行的圆弧运动。就活塞机相对于冲程容积的尺寸而言,比用往复啮合的内轴式机优越。但它的不断地转移着的径向应变则不如内轴式机旋转气缸上的离心应变容易处理。

### 3.2 拱弧啮合

用拱弧啮合的单纯旋转机型和行星旋转机型分别见表 7 II/1—4, 6, 8 和表 8 II/5—8, 11。估计盖洛韦在 1846 年发明了第一个内轴式行星旋转机,见型式图表 12 第 3 行第 2 个。他将它作为船用蒸汽机,但由于没有密封元件,性能不令人满意。

林德在 1914 年曾倡议采用拱弧啮合的内轴式单纯旋转四冲程发动机,见表 12 第 1 行。

有些旋转活塞机,它们的啮合部件间的接触点是不断地转移的,只能用一种特殊的格栅装置来密封。格栅装置的密封元件彼此接触,实际上能堵塞任何漏道。用拱弧啮合的旋转活塞机,接触点也是不断地转移的,但因为啮合部件上的所有各点都沿平行轨道运行,因此需要的密封元件较少。为达到良好的密封,密封元件必须稍凸出于密封槽。密封元件将啮合部件的大弯曲面分

隔成一定数目的小圆弧段,密封接触点则顺次从一边到另一边转移。

表 8 II/11 所示是克普凯 1942 年所发明的外轴式行星旋转机。

### 3.3 交 銜 啮 合

具有旋轮线曲线的交銜啮合内轴式单纯旋转机有两种,即曲线创成点与密封元件装在内和外转子上的内转子机和外转子机,见表 7 III/1, 2。

具有旋轮线曲线的行星旋转机则有四种,见表 8 III/5—8;两种具有内转子,两种具有外转子。一种的曲线创成点与密封元件装在内转子上,另一种则装在外转子上;另外两种的曲线创成点与密封元件则分别装在静止的内和外工作室壁上。

表 7 III/1 所示是库利 1901 年所发明的蒸汽机的单纯旋转式机型。它的基本原理曾被用到行星旋转式内燃机上。这种结构的优点是工作室几乎没有虚位移。日本五十铃公司在 1963 年曾制成一台速比为 3:2 的单纯旋转式四冲程发动机。它的特点是进排气口简单,两个气口都在内转子上。赫普纳在 1954 年先曾研究过这种结构,但他发现,进排气势必必要通过轴,因而决定不再深入设计。五十铃公司的发动机有些象速比为 2:3 内转子具有象“8”字形旋轮线形状的滑移啮合(内)式发动机。外转子既要内转子包络在内又需安装密封元件,因此发动机的体积与工作室容积间的比例是不够理想的。如果将发动机做成行星旋转式,则部分功率必须用齿轮传递,也不合适。再则,行星旋转式发动机需要有足够的气口尺寸和气门开启时间,这也不容易做到。譬如,气口——象二冲程发动机一样,是必不可少的——固然可以开在端盖上,但正如一般往复式二冲程发动机一样,又不能没有预压过程——一般往复式二冲程发动机是利用曲轴箱压缩来进行排气扫气和进气充气的。如果气口面积给足了,则气体的压缩和膨胀过程又会相应地缩短。根据赫普纳 1957 年的研究,如果采用四冲程,就必须要有两个旋转圆盘气阀——每边一个。发动机的重量因而增加,如采用行星旋转原理,轴承负荷将由于离心力而大大提高。增加发动机的尺寸当然也是不利的。除了提升阀外,只能用适当转速的旋转阀来控制气口开启定时。这类内燃机的早期型式未能应用,一部分原因是由于存在这些问题,但主要还是由于密封困难。

自从汪克尔发动机的参数和密封系统被发现以后,雷诺和其他公司决定继续研制库利式行星旋转式内燃机。

从表 8 III/7 和表 13 中可以看出,根据同样原理设计具有相等速比的旋转活塞机,外形可能有很大差别。如有一台旋转活塞机,速比为 2:1,转子具有圆形截面或其周面由圆弧组成,则转子可在圆柱形齿隙两边的平行壁内运动。这种现象同一个行星小齿轮在直径为两倍的内齿轮中滚动时小齿轮的节圆上一点的轨迹应为一根直线的情形一样。表 13 第 2 行第 1 列位置上的简图代表这种机型。这个具有圆形转子和近似椭圆形缸型的机型与同表上面一行中的一个机型相似,只是后者是圆形转子和旋轮线缸型的组合。两者的区别在于具有旋轮线的那个机型只有两个曲线创成(接触)点,而具有两条直边的近似椭圆形缸型的机型则是多点接触。

穆瓦奴发明的具有螺旋式啮合的行星旋转泵的剖面 and 表 13 第 2 行第 1 图相似。

如速比保持为 2:1,但用两个或多个圆形转子,则可得到弗兰岑和法尔贝克 1901 年所设计的蒸汽机。

威特在 1949 年提出类似的柴油机设计。采用球形或平行于旋转轴的滚动圆柱形活塞,即使可以解决密封问题,但这种旋转活塞机并不可取。尤其是多转子旋转活塞机,因为气缸数须倍于活塞数,相对于工作室的位移容积而言,机体过于庞大。只有在采用一个双动式活塞的情况下——见表 13 第 2 行第 1 图——位移容积/机体尺寸的比值才可能合理。

但是,如将这种设计先改变为单纯旋转机,就有可能进一步将它改变为易于密封的往复啮合行星旋转机。其方法是使活塞-转子与轴间有一偏心矩,并使缸体成为旋转密封部件,这样便得到一单纯旋转机。将这个单纯旋转机的转子改变成行星旋转式转子后,便得到所要的行星旋转机。结构如表 11 第 2 行第 1 个所示。

表 13 第 2 行第 2 列和第 3 行第 2 列所示的两个具有多活塞形状转子的型式可从第 2 行第 1 列所示的单活塞机引伸而来。再则,在同表上可以看出,如将速比为 4:3 的旋转活塞机的创成点和密封元件的数目加倍,则可能得到外形差别很大的活塞转子。这个例子并说明齿和隙的数目可以保持不变。但将齿和隙的数目都改为 6,同时不改变 8 个密封元件的位置,也同样是可能的。

沃林特和斯科 1923 年曾设计一种速比为 6:5 的行星旋转式四冲程发动机,如表 14 所示。逊索德拉沃则于 1938 年试制了一台单纯旋转式发动机,见表 7 III/2 和表 15。这种设计就基本结构来说,气缸虚容积(即最大容积减去冲程容积)较小,气口可由转子运动来开启关闭,但是由于受到气流的限制,必须要在内转子上挖去一部分后,气口的开启面积和时间才能足够。这样一来,每一气缸的虚容积又要增加,因而这种设计实际上不可能产生现代所需要的压缩比。

要识别每一种旋转活塞发动机方案是否可能以最简单的方式来实现四冲程循环并不容易。刚才提到的交衔啮合(内)机型,只有在速比为 4:3 和 6:5 等情况下,才有可能设计成适合于四冲程的结构。在所讨论的滑移啮合(内)机型,则只有在速比为 2:3 和 4:5 等情况下,才可实现奥托循环。所有其他具有旋轮线缸型的结构,包括交衔啮合(外)和滑移啮合(外)式,有的根本难于应用到四冲程循环,有的则需要外加工作过程例如二次膨胀、扫气甚至增压,从而使发动机成为特种循环发动机。要使那些结构能产生四冲程循环,唯一办法是采用相当复杂的机构和另加定时设备。

旋轮线旋转活塞机的各种改型见表 8 III/5(表 14)。例如,速比为 2:1 的旋轮线旋转活塞机曾改成活塞在缸壁上滚动的单纯旋转机。在此似应重提一下:一个圆在两倍其直径的另一个圆内滚动时,则圆周上任何一点的轨迹是一根直线。因而,缸壁的两侧是笔直的。在速比为 3:2 的旋轮线旋转活塞机下面是一种平面叶片式旋转活塞机,这种型式是四十年代初期由迪布拉西为飞机增压器而设计的。改变偏心矩,亦即曲轴行程,可以得到外形完全不同的速比为 4:3 和速比为 5:4 的型式。

表中最下一行示出速比为 2:1、3:2 和 5:4 的各种型式,和上面型式比较起来,工作室形状变化甚大,这是由于创成点和密封元件数目比上面型式加倍的缘故。在速比为 3:2 和 5:4 的型式图上,可以看到内转子伸入它的啮合件内作几乎等同于往复活塞的运动,截面图所示的啮合件和往复式发动机气缸相象,缸壁几乎是平行的。

汪克尔在 1950 年曾进行过一台速比为 5:4,将创成点和顶端密封加倍的旋转活塞机的设计。所用的径向顶端密封结合轴向密封板装置实际上是第一个速比为 2:3 的滑移啮合(内)四冲

程发动机密封系统的前奏。

和输送重油或其他液体的齿轮泵相似的几种内轴式机型见表 7 III/3, 4, 8。有人曾将这类机型应用到内燃机上。例如 1924 年布朗和博韦里公司的二冲程发动机。

有一类旋转活塞机装有一围绕主曲柄或偏心旋转的副曲柄, 转子本身则装在副曲柄上。杜伊尔或鲁甫发动机就具有这种曲柄加曲柄的装置, 转子可通过适当的齿轮组合作等速旋转。由于这种双曲柄装置, 每一个转子顶角的三角形轨迹有些象尖形的内旋轮线, 机构可以做到完全平衡, 但副曲柄销估计须受到波动甚大的离心力负荷。

下面提到的基本原理适用于具有曲柄加曲柄(双曲柄)装置的旋转活塞机。

这类旋转活塞机可属于行星旋转式或行星型转动活塞式。如相位变化完全依靠由装在中心的齿轮装置所控制的转子或曲柄运动, 则活塞机不是属于往复式便是属于行星旋转式。这两类活塞机都可以做到完全平衡。这种双曲柄甚至三曲柄(曲柄围绕一个曲柄销旋转, 这个曲柄销围绕另一个曲柄销旋转, 另一个曲柄销则又围绕第三个曲柄销旋转)的所以能应用到旋转或往复式活塞机上, 是因为功率传递转子(活塞)的轨迹, 实际上可能是一个圆、一个尖形甚或环形的旋轮线或一根直线。皮克特或琼斯研制的旋转活塞机即是属于上述类型的例子, 这两种旋转活塞机的旋转连杆就是副曲柄。

表 7 III/9, 10 位置上的外轴式机型具有较短的旋轮线曲线而没有静止的室壁, 因为室壁是由啮合部件本身, 即一个部件的齿和另一个部件的隙所组成。实际位移容积比较小, 视齿形和大小而定。

表 7 III/11 所示的外轴式机型, 具有一个功率传递转子和一个密封转子, 在一个共同的缸体内。采用这种机型的内燃机曾受到人们的重视。可用来代表这种机型的另一个重要例子是被广泛应用的, 同样具有“8”字型缸型的一种外轴式齿轮泵。这种单纯旋转机没有变速部件, 名为帕彭海姆泵。

1848 年由琼斯在英国所发明, 1866 年后在美国被命名为鲁茨式的鼓风机, 实际上难于改装成发动机, 虽然霍尔特和杰克逊曾在 1841 年将这种鼓风机的原始形式应用到蒸汽机上。具有静止内室壁结构的机型见表 7 III/12, 14, 而表 7 III/15, 16 所示则是具有内外工作室壁的外轴式机型。贝伦斯在 1867 年曾按照表 7 III/16 机型设计了泵和蒸汽机; 由于当时所用的压力一般都很低, 同时面积大而距离小的间隙已起着足够的堵塞作用, 因而不需要安装密封元件。

表 8 III/11 所示机型, 转子两端是球形活塞(齿), 球形活塞在圆弧轨道上运转, 并与桶状气缸啮合。桶状气缸装在一旋转基杆两端的枢轴上, 同样地沿圆弧轨道运转。

表 8 III/13—16 是四个具有不旋转的外室壁的外轴式行星旋转机机型。在外轴式单纯旋转机中常见的“8”字形缸型, 在这类机型中显然是不需要的, 因为有一个啮合部件已经起着不旋转缸体的作用。这个啮合部件可以包络或伸入形式成为工作室的外壁或内壁, 这要视个别设计而定。

如行星旋转机具有“8”字形缸型, 则这个缸体起着密封部件(包容工作介质)的作用, 并且和啮合部件一起围绕旋转活塞机的静止件运转。

### 3.4 滑移啮合

表 7 IV/1 和 2 所示是具有旋轮线型面的气缸或转子的内轴式滑移啮合单纯旋转机型,表 8 IV/5—8 所示则是这类单纯旋转机的改型。菲克逊 1935 年曾作了关于曲线创成点装在外部件上的滑移啮合式旋转活塞机方面的叙述。其速比为 3:4 和 4:5 的滑移啮合(外)行星旋转机见表 8 IV/7 (表 16)。菲克逊的设计采用螺旋式滑移啮合。

表 7 IV/1 所示的单纯旋转机和表 8 IV/7 所示的速比为 2:3 的行星旋转式改型,系梅勒德在 1943 年发明的。有几种航空发动机的压气机系按照这种机型设计的。这种机型不适用于四冲程循环,因曲线创成点和密封元件,由于位置所限,不能将滑移啮合(外)旋转活塞机的工作室按照所需要的方式予以分隔。

速比为 1:2, 密封元件装在内部件上的滑移啮合(内)旋转活塞机,如表 7 IV/2 和表 8 IV/5 (表 18)所示,是由盖洛韦设计的。1834 年后人们都知道采用这种机型的蒸汽机,但实际上这种机型主要是用来制造鼓风机和压气机的。目前法国普朗什仍在生产这类行星旋转式压气机,但采用扁平弹簧钢气阀。要将它改变为内燃机,则还须增加一旋转气阀;或使两个这样的机构结合在一起,一个作为压气,另一个作为膨胀或输出装置。

速比为 1:2, 密封元件装在内部件上的滑移啮合(内)旋转活塞机和上述具有外密封的滑移啮合(外)旋转活塞机虽然当时已经存在,但是并没有人去探索其他速比的滑移啮合(内)旋转活塞机。这可能是因为当时还没有根据啮合方式同时又考虑到曲线创成点位置的旋转活塞机的分类。另一种可能是人们认为速比为 1:2 具有工作室的滑移啮合(内)旋转活塞机只不过是一种特殊的能给出一定速比的外旋轮线齿轮装置。

滑移啮合(内)式四冲程发动机的进排气口随着内转子的转动而自动定时。气口面积和开启时间可能不需要修削转子便已足够。工作室的最小容积相当小,对于现代奥托循环发动机来讲,压缩比都可达到要求,但对于压缩比高得多的狄塞尔循环来讲,旋转中心间的距离必须减小,否则须加压缩器。但是,如将偏心矩减小,则位移容积势必跟着减小。因而,如果位移容积相等,则狄塞尔发动机(柴油机)的总体要比奥托发动机(汽油机)的大。速比为 3:4 的滑移啮合(内)旋转活塞机,如表 7 IV/2 (表 17)和表 8 IV/5 (表 18)所示,是外加膨胀室或充气室的单纯和行星旋转发动机,而速比为 4:5 的机型则可用两个进气和排气过程,或具有一个充气和一个二次膨胀过程。滑移啮合(内)旋转活塞机的每一工作室的最小容积是随速比的增加而增加的,因此要达到所需的压缩比,就只有减小旋转中心间的距离(偏心矩)。

### 3.5 反向啮合

反向啮合式单纯旋转和行星旋转机型可分别见表 7 和表 8 的第 5 行。表 7 V/10 所示单纯旋转机型是由德国谢菲尔发明的,这种机型没有工作室缸壁。表 7 V/13 所示机型是沃尔特 1957 年所发明的燃气发生器。

### 3.6 往复和滑移啮合

估计前人已经知道了一种规律,即所有采用往复啮合或具有往复运动的行星旋转机不可能改变成单纯旋转机,否则行星旋转机不会在一段很长的时期内没有人去着手作这样的更改。表 8 VI/5, 8 所示兼具往复和滑移啮合的内轴式行星旋转机不能改变为单纯旋转机,正是因为它们都具有往复啮合部分。这两种机型都具有静止的缸体,缸型实际上是旋轮线而不是圆形。

表 8 VI/5 (表 19)所示是弗朗肖 1861 年所发明的机型。这种行星旋转机和多叶片式旋转活塞机不同,它具有直通式叶片,叶片重心以两倍于实际转速的速度作圆周运动,而多叶片式旋转活塞机的功率传递部件——叶片的重心——则以变速沿一近于圆形的轨道运转。伍德科克旋转活塞机和现代的佐勒型式一样,都采用一对直通式叶片,因而具有四个镰刀形的可变容积工作室。内燃机上用的增压器和其他压气机有的采用这种结构形式。

在这类较旧式的旋转活塞机上,叶片是在旋轮线缸壁内转动的。此后有一种设计则装有滑动块(即苏格兰轭)。随后才有佐勒式,每一直通式叶片沿着一个静止的内环运转,因而须有适当的形状(见表 19 第 4 行)。

现在可将三种机型作一比较:即表 8 IV/5 (表 18)所示的滑移啮合(内)式,表 8 I/1 (表 11 第 1 行第 2 个)所示的往复啮合式和表 8 VI/5 所示的滑移和往复啮合混合式。在这三种行星旋转机型中,仅第一种可改变为单纯旋转式,见表 7 IV/2 (表 17)。这种机型的内转子是密封部件。第二种机型,由于在工作室内具有往复运动部件,不能改变为单纯旋转式。第三种机型,由于密封部件的往复运动,也不能改变为单纯旋转式。

### 3.7 滑移和反向啮合

兼具往复和滑移啮合的行星旋转机型已在第 3.6 节中详述,并已列在表 8 的第 VI 行。两种不同方式的啮合在这类机型中同时存在。表 7 和表 8 所示的各种单纯旋转和行星旋转类型中还有兼具滑移和反向啮合的机型,见这两个表中的第 XII 行。

表 7 XII/1, 4 所示两种机型是英国内燃机研究协会研制的。这类机型被用在一种发动机增压器的样机上,密封部件——内转子——和转子外壁作滑移啮合,又和转子内壁作反向啮合。属于行星旋转类的这种机型见表 8 XII/9。

表 7 XII/8 机型代表一种由里茨和施魏策尔研制的早期泵。将它和英国内燃机研究协会的机型相比较,可以发现英国内燃机研究协会的鼓风机叶片的滑移啮合和反向啮合是同时进行的,而里茨和施魏策尔泵的叶片则不是这样,它与内转子壁的滑移啮合和与外转子壁的反向啮合不是同时发生的。

属于行星旋转类的这种机型见表 8 XII/6。



### 3.8 附加的旋轉和圓周运动

可以使旋转活塞机的某些运动部件产生附加的旋转或圆周运动，从而得到和原来机型不同的混合机型。例如，表 8 第 II、III、IV 行第 5—8 列所示的各种行星旋转机型的转子就有产生附加旋转的可能性。这类机型都具有一个装在曲柄销上的转子和一个静止的内或外室壁。表 20 表示这类机型的转子在不同角度的位置。表 21 表示具有附加运动部件的几种机型。一般来讲，旋转活塞机的设计应避免附加运动，除非有必要用它来组成可变容积工作室。在特殊情况下，可用改变静止部件为运动部件的办法来改善气口开启定时或使一个部件能传递功率。

偶尔有些设计没有明显的理由也采用了迭加运动。在单纯旋转和行星旋转类型中，这种倾向特别显著。

在原来的运动上迭加一种或多种不必要的运动常使机型的分类产生极大的困难。上述表 20 所示的机型，虽然只有两个转子，分析起来就感到不很容易。运动部件多了，困难自将更多。

识别迭加运动有时很重要，因为可能有这种情况：一个本来作变速运动的部件，在它的重心上加上附加运动后，可能改变为作等速运动。在这种情况下，所假设的迭加运动的量值必须加以估计，当作一项特种运动。