

〔苏联〕

B. K. 柯施金等著

热力装置中的 自由活塞发动机

上海科学技术出版社

热力装置中的自由活塞发动机

[苏联]B.K.柯施金等 著
季 克 勤 等 校 译 阅

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书闡述了自由活塞发动机热力裝置的結構、理論、計算和应用方面的新資料。介紹了一些研究自由活塞发动机工作过程的近代研究方法和試驗研究所得的結果。

同时以試驗研究工作为基础，对自由活塞发动机的工作过程进行了分析。

本书适用于发动机制造方面的工程技術人員和科学研究人員，并可供高等学校的師生参考。

热力装置中的自由活塞发动机

ДВИГАТЕЛИ СО СВОБОДНО
ДВИЖУЩИМИСЯ ПОРШНЯМИ

原 著 者 [苏联] В. К. Кошкин,
Б. Р. Левин,
И. Н. Кутырин,
Б. П. Борисов

原出版者 Машгиз . 1957 年 版
译 者 季 謨
校 閱 者 沈 克 勤 等

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海发行所总經售

開本 850×1168 1/32 印張 8 4/32 字數 199,000

1959 年 11 月第 1 版 1959 年 11 月第 1 次印刷

印數 1—3,000

統一書号：15119 . 1313

定 价：(十四) 1.40 元

作者謹以本書紀念親愛的老師
尼古拉·維克多羅維奇·伊諾斯姆采夫

原 序

創造最經濟的、大功率的熱力裝置，是社會主義生產在高度技術發展的基礎上不斷增長的最重要條件之一。

在設計現代化的熱力發動機時，必須解決下列主要問題：

(1) 創造可靠的發動機結構；

(2) 獲得較高的比功率，同時取得發動機的高度經濟性。

如果順利地解決了這些問題，就有可能創造比較完善的熱力裝置。

從現代發動機製造的情況來說，除了要發展現已熟悉的型式的熱力發動機以外，還迫切需要擴大科學研究工作，以尋求新的高效熱力裝置的可能型式。

本書研究了帶有自由活塞發動機的新型聯合熱力裝置，並且分析了這類裝置的經濟性。

自由活塞發動機具有很多優點，在工業、農業、運輸業的各個部門中已經得到了愈來愈多的應用。

本書在頭兩章中對帶有上述發動機的熱力裝置進行了研究。第一章討論自由活塞發動機—燃氣輪機聯合裝置，第二章闡述自由活塞柴油壓氣機。

在第三章中研究了燃氣傳動燃油系統的理論問題。這一章中還闡述燃氣傳動燃油系統的一般特性，探討這些系統的方案，及其在自由活塞發動機中被採用的可能性。

本书是由几个作者共同写成的。

第一章“自由活塞发动机联合热力装置”由 В. К. 柯施金和 Б. Р. 列文执笔；第二章“自由活塞柴油压气机的研究”是由 В. К. 柯施金、Б. Р. 列文、И. Н. 庫蒂林和 Б. П. 波里索夫集体执笔；第三章“燃气传动燃油系统的特性”是由 В. К. 柯施金和 Б. Р. 列文执笔編著。

本书已涉及到研究各种类型发动机的重要問題，并且分析了它们的工作过程，同时又列举了很多新的資料。如有批評性的意見，請按下列地址寄給我們：

Москва, Третьяковский пр., 1, МАШГИЗ.

目 录

原 序

第一章 自由活塞发动机联合热力装置

§ 1 自由活塞发动机-燃气轮机联合装置的优缺点.....	1
§ 2 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置的应用范围.....	8
用于发电站的自由活塞发生器-燃气轮机联合装置.....	8
用于泵站的自由活塞发生器-燃气轮机联合装置.....	15
铁路运输用自由活塞发生器-燃气轮机联合装置.....	18
水运中的自由活塞发生器-燃气轮机联合装置.....	19
汽车用自由活塞发生器-燃气轮机联合装置.....	31
§ 3 新型自由活塞燃气发生器的主要类型.....	37
§ 4 自由活塞燃气发生器结构的发展.....	52
自由活塞燃气发生器的尺寸和数目的选择.....	53
自由活塞燃气发生器气垫室的配置.....	55
活塞环的使用寿命.....	60
燃油供应系统的选择.....	61
自由活塞燃气发生器的压气机阀门.....	71
工作稳定性和调节.....	74
径流式燃气轮机的采用.....	82
§ 5 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置的特性.....	84
特性的计算方法.....	84
自由活塞发生器-燃气轮机联合装置的经济特性.....	95
燃气轮机的比功与联合装置参数的变化关系.....	100
自由活塞发生器-燃气轮机联合装置的工作过程参数.....	109
空气旁通燃气储气室部分负荷时联合装置的经济性.....	110
§ 6 自由活塞发生器-燃气轮机联合热力装置的某些特殊方案.....	124

第二章 自由活塞柴油压气机的研究

§ 7	自由活塞压气机.....	133
§ 8	供作研究的自由活塞柴油压气机设备状况及其基本参数.....	137
	自由活塞压气机的结构.....	139
	燃油泵和喷油咀.....	147
	空气压力自动调节器.....	150
	机油泵.....	153
	冷却系统的水泵.....	153
§ 9	研究方法及试验设备.....	155
	研究方法.....	155
	确定自由活塞压气机循环数的仪表.....	158
	自由活塞压气机所采用的示功方法.....	159
§ 10	自由活塞压气机试验装置的研究结果.....	167
	确定最有利的喷油开始时间.....	168
	储气室中压缩空气压力不变时自由活塞压气机排气量 (负荷)的变化特性.....	173
	自由活塞压气机的调节特性.....	177
§ 11	自由活塞压气机和 BKC-6 型压气机装置的主要技术经济指标的比较.....	179
§ 12	自由活塞压气机工作过程的研究.....	182
§ 13	自由活塞压气机中自由活塞的动力学研究.....	206
§ 14	研究用自由活塞压气机主要尺寸的計算.....	219

第三章 燃气传动燃油系统的特性

§ 15	燃气传动燃油系统的特点.....	223
§ 16	燃油泵柱塞运动的基本計算方程式的探討結果.....	225
§ 17	将基本計算方程式换算为无因次形式.....	228
§ 18	无因次方程式的定性分析.....	233
§ 19	燃油系统设计参数对供油规律的影响.....	237
§ 20	燃气传动喷油泵与机械传动燃油泵的比较.....	245
§ 21	自由活塞发动机中供油规律的計算特点.....	248

譯后記

参考文献.....	253
-----------	-----

第 一 章

自由活塞发动机联合热力装置

§ 1 自由活塞发动机-燃气轮机联合装置 的优缺点

最近几年来出版了大量的著作，对自由活塞发动机的各种热力装置结构进行了分析，并研究了它们的工作过程。

这些发动机运用到工业的各个部门可分为两条路线：一条是創造自由活塞压气机；一条是設計由自由活塞燃气发生器和燃气轮机组成的联合热力装置。

关于自由活塞装置的主要理論和結構，在以前所出版过的著作中已有叙述〔6〕，并曾对以前发表的各种研究成果进行了評述。

本书在下面叙述自由活塞发动机的各种問題时，将采用以前著作〔6〕所采用过的术语和符号。

自从上述著作〔6〕出版以来，我们又积累了很多有关已經生产过的联合热力装置的新資料，这类热力装置是由作为燃气发生器的自由活塞发动机和燃气轮机所组成。

联合热力装置的发展比較迅速，已在工业的各个部门中得到日益广泛的应用，用于固定式和移动式发电设备中，用于铁路和水运事业中等〔6〕，〔22〕，〔23〕，〔25〕，〔27〕，〔32〕。

目前，带有 GS-34 型自由活塞发生器的燃气轮机联合装置在法国以及非洲、新喀里多尼亚島、哈瓦那等地已用来作为发电站的主要动力设备。这些设备的功率約在 500~15,000 瓩 的 范 围 內。

在水运和铁路运输中已相当广泛地开始采用这类热力装置。法国建造并已开始航行的船只“Contenac”和“Mérignac”号就装有这种热力装置；石油船“Bethsabée”号也安装了带有 GS-34 型发生器的、容量为 500 瓩的发电设备。目前，法国“Sirius”系列的 21 艘扫雷舰上亦采用了带有 GS-34 型发生器的燃气轮机装置，并已开始生产装有 GS-34 型发生器-燃气轮机联合装置的捕鱼船和捕鲸船，其功率达 1,800~3,500 马力〔40〕。“Renault”公司曾经将 1,000 马力的 GS-34 型发生器-燃气轮机联合装置装在机车上进行试验，其结果说明这种机车的效率很高。在法国和英国已经开始生产装有这种 2,000~2,400 马力热力装置的新型机车。目前，船用和机车用自由活塞发生器-燃气轮机装置的总功率在 1,000~16,000 马力范围内〔40〕，〔49〕。

自由活塞发生器-燃气轮机联合装置，最近在使用方面有可能迅速地扩大，因为实际上已经解决了制造小功率燃气轮机的问题，并且已创造出从 15 马力开始而且结构紧凑的燃气轮机装置〔31〕。

燃气轮机制造方面取得的这些成就使我们有可能在汽车运输中采用自由活塞发生器-燃气轮机联合热力装置，以及运用这些装置作为紧凑而价廉的固定式和移动式设备来供应农业机器站、集体农庄、国营农场、特别是垦荒地区所需的电力。

这类联合热力装置（自由活塞燃气发生器-燃气轮机）所以能得到广泛的应用，是因为它和曲柄连杆机构内燃机或一般燃气轮机相比较，具有很多优点。

其主要的优点如下：

1. 将发动机和压气机合并在一个机组（自由活塞燃气发生器）内，成为直接作用的活塞发动机，便有可能制造成紧凑的热力装置，在制造上所消耗的材料很少，并且几乎完全可以不采用贵重的耐磨合金。

2. 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置在一定条件下有可能使工作过程具有很高的经济性(效率等于 40 %或更高些),这是由于将燃气轮机装置和压燃式发动机(柴油机)的主要优点合理地结合在一起,并且将它们原有的缺点消除了。

在这种联合热力装置中工作气体的取得是在动力气缸内高压高温的情况下发生的,类似的高压高温在一般燃气轮机中不可能达到。同时,由于在装置中有燃气轮机,故能产生完全膨胀的热力循环,这种热力循环在一般内燃机中又是不可能实现的。

3. 联合装置中很高的总效率(近 40 %)是在不很高的燃气压力以及燃气轮机前面不太高的气体温度($500 \sim 600^{\circ}\text{C}$)下达到的。因此,就不需要采用贵重的特殊耐热材料来制造燃气轮机的叶片。

4. 自由活塞燃气发生器是一种完全平衡的机构,不产生曲柄连杆机构发动机所具有的震动;因此不需要建造强大基础工程和强大机架,大大地降低了这种装置在安装和使用上的费用。

5. 在自由活塞燃气发生器中可以根据喷进燃油的多少改变活塞行程的内、外止点位置,这样就可以很简单地、经济地调节压气机内所送进的空气量。此外,在自由活塞发生器-燃气轮机联合装置中也可以将压气机以后的空气直接通进燃气轮机,以进行补充调节。上述各点使我们有可能在很大的范围内调节机组的功率,而不会大大降低它的经济性[6]。

类似的优良性能使这种热力装置比一般的燃气轮机显得优越,因为对于一般的燃气轮机调整功率时会大大降低其经济性。

6. 采用自由活塞发生器-燃气轮机联合装置可以延长设备的使用期限,因为这种发动机的结构比较简单(没有曲柄连杆机构,没有承受较重负荷的轴承等),而且在燃气轮机前的气体温度比较低。

7. 采用自由活塞发生器-燃气轮机联合装置可以合理地利

用房屋来分别安装整个设备的各个机组，因为发生器和燃气轮机是通过管道来联接。

8. 因为发生器具有可变的活塞行程，因此起动时可以提高压缩比，这样，甚至在周围温度相当低的情况下能保证可靠的起动。

9. 当一般内燃机采用增压进行强化时，由于循环压力大大提高，发动机运动件的安全系数势必增加，轴承和曲轴的尺寸也要增大，这样不可避免地要加重发动机的重量，使它不能趋于紧凑。其可能解决的办法是根据增压压力的提高程度降低动力气缸中的压缩比。在自由活塞发动机中由于活塞和传动轴中间没有联系，因此可以自动地改变自己的行程，因而也自动地改变了压缩比，这样，即使增压压力在很大的范围内变动，动力气缸中的压力不致有很大提高，保证了发动机的正常工作〔6〕，〔35〕。

10. 由于燃气轮机所发出的单位有效功（一公斤工作燃气的功）增加，装置中空气的单位消耗量（单位功率的空气消耗量）和一般燃气轮机相比较是大大地减少了，这样，便不需要安装大尺寸的燃气和空气管道。

在一般燃气轮机装置中，燃气轮机的计算功率应该比用户在燃气轮机主轴上所获得的有效功率大数倍。因此，在相同有效功率的情况下，一般恒压燃气轮机在尺寸方面要大于自由活塞燃气发生器联合装置，因而价格也比自由活塞联合装置来得昂贵。

11. 自由活塞发动机的燃料，和柴油机及燃气轮机一样，可以采用各种各样便宜的燃料（索拉油，重油和石油的其他重蒸馏物），当实行双相过程*时还可以采用当地的各種气体燃料。

12. 自由活塞发生器和燃气轮机所组成的联合装置具有很好

* 自由活塞发动机除采用液体燃料外，同时可采用其他燃料如气体或固体燃料——譯者注。

的加速性能，工作时很快地可以达到额定功率。起动时不需要长时间加热。这对船舶和机车来讲特别重要。

13. 自由活塞发动机和一般内燃机相比较在使用时很少发生损害事故。在一般内燃机中活塞是通过曲柄连杆机构与储存大量能量的飞轮相连接的，而在自由活塞燃气发生器中，赋予活塞的能量是仅仅在一个行程中便完全耗费掉。因此，当发生器中因故障而摩擦稍有增加时，压缩便行减低，发动机的活塞就停止不动，不会发生由于活塞咬死而引起的损害事故。

14. 当几个自由活塞燃气发生器在一台联合装置中同时工作时，每个燃气发生器完全有可能独立地工作，这样在使用中可能保证整个装置可靠地运转。

15. 和蒸汽动力设备比较，自由活塞发生器-燃气轮机联合热力装置重量轻，占地小，因此可以将这些外形尺寸小而紧凑的装置使用于各种运输设备（铁路、水运、汽车）和建筑机械中。

16. 自由活塞发生器-燃气轮机联合热力装置和一般燃气轮机及柴油机相比较具有和蒸汽机相似的最好的起动扭矩。

例如，在很多联合装置中，燃气轮机主轴上的最大扭矩，当燃气轮机主轴完全制动的情况下，要比最大转速时的扭矩大2.5倍。当燃气轮机转速增加时，扭矩便迅速减小〔6〕，〔32〕。因此自由活塞发生器-燃气轮机联合装置要比装有内燃机的设备优越。一般内燃机在低转速下不可能工作，因为在此情况下轴上的扭矩很小。

17. 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置可以获得很大的功率范围，其方法是將一组标准尺寸的自由活塞燃气发生器很简单地组合起来。

18. 一组中的各个发生器不一定要同时工作，因此在很多情况下个别自由活塞发生器需要进行小修时，整个联合热力装置可不必停止工作。

19. 采用自由活塞发生器-燃气轮机联合装置所组成的发电

站结构简单，容易检修，制造、使用和维护的费用较低。

20. 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置用于机车、船舶和其他动力设备上时可以采用机械传动，不需要昂贵的电力驱动。

根据自由活塞发生器-燃气轮机联合装置在工业部门中使用的经验，可以预料到这种热力装置最近将在工业部门中得到广泛的应用。

使用经验也告诉我们，将这些装置用于农村作为主要的移动式 and 固定式电站以及在大功率电站中作为备用动力装置最为合理。此外，也完全可以证实，自由活塞燃气发生器联合热力装置在水运和铁路运输中以及在泵站中用来吸送天然气及石油，均具有很好的效率。

应该指出，除去上述优点以外，自由活塞发生器-燃气轮机联合装置也有下列缺点：

1. 在自由活塞燃气发生器中也具有跟一般内燃机一样的主要零件：气缸和活塞，它们容易磨损，因此和一般的燃气轮机的零件比较起来，需要比较细致的维护和保养。

2. 因为具有同步机构，影响了整个装置的紧凑性。

3. 如果不带特殊的独立气垫室，则自由活塞燃气发生器的稳定工作的范围决定于压气机余隙中压缩空气的能量。

但是，随着动力气缸中供油量的改变程度活塞行程也有所改变，因而，也改变了压气机中气垫的作用。这样一来，当负荷在很大的范围内变化时自由活塞发生器的工作也不会稳定。此外，压气机余隙容积的增大会降低压气机的容积效率。

4. 当负荷在很大范围内变化时，为了使发动机的工作稳定，应该带有特殊的气垫室，以便形成独立的气垫。这样，使发动机的结构趋于复杂化，而影响了紧凑。

5. 因为自由活塞燃气发生器中活塞行程是可变的，扫气和充气过程的质量也随着发动机负荷的改变而变化。因此配气相角

需要这样选择：当活塞最小行程时要保证动力气缸上进气孔和排气孔的足够开启。因此，当发动机在全负荷时以及当活塞最大行程时配气相角就不是最理想的了。

6. 在自由活塞燃气发生器中要传动很多辅助机组，因而存在一些困难，特别是传动燃油泵。因为凸轮轴转速不均匀，燃油向工作气缸喷射很难正常。当发动机的活塞接近内止点时，其速度很慢，油泵凸轮的转速也同样很慢，向发生器供应燃油很难作可靠而迅速的喷射。

为了要消除这一缺点，可将喷射提前角加大，但是这样可能会降低发动机工作过程的效率。或者采用储压式喷油系统，但这样就会使发动机的结构趋于复杂化。

可是，完全有可能采用以燃气传动的单整式喷油泵（油泵-油咀）作为自由活塞燃气发生器合理的供油系统。利用这种喷油泵可以保证燃油可靠地、迅速地喷射，而与发动机活塞的运动规律不发生关系。

7. 建立紧凑的自由活塞发生器-燃气轮机热力装置在理论上是可能的，但实际上往往不可能完全实现。当燃气的消耗量很大时，需要安装几个独立的发生器，这样便增大了装置的外形尺寸。当几个自由活塞发生器配置一个燃气轮机工作时，需要具有工作燃气储气室，这样又成为流阻损失和热损失的额外来源。

根据上述各点可以肯定，当制造自由活塞发动机的新样品时不得不克服一系列的困难。这些困难可能是属于结构方面的，也可能是属于工艺方面的。

为了要掌握这类发动机，有必要下很大的功夫来改进所设计的自由活塞发生器，以弄清他们的缺点，选择比较合理的结构。

但是，必须指出，自由活塞燃气发生器的优缺点比较起来，优点还是主要的，设计师和研究工作者进一步的工作是要大大地缩小上述的缺点。

§ 2 自由活塞发生器-燃气轮机联合装置的应用范围

用于发电站的自由活塞发生器-燃气轮机联合装置

目前,自由活塞发生器-燃气轮机联合装置在很多国家中得到广泛的应用〔23〕,〔8〕,〔31〕,〔47〕,〔49〕,〔51〕。在法国,使用“SIGMA”GS-34 型燃气发生器的装置已经成批生产了好几年。

自由活塞发生器-燃气轮机联合装置愈来愈多地在电站中作为固定式设备使用。它们在中小功率电站中用来作为主机,在大功率电站中作为备用机组〔6〕。图 1 示功率为 5,000 瓩的这样一个电站〔25〕。这种电站的动力设备由发电机、传动装置以及根据所需功率大小由 3 或 4 只供应燃气轮机燃气的自由活塞发生器组成。这种组合起来的装置首先可以保证得到很大的功率。所需发生器的数目取决于实际经验和使用的经济合理性。

根据资料,将发生器联合使用可以使功率达到 150,000 马力〔26〕。

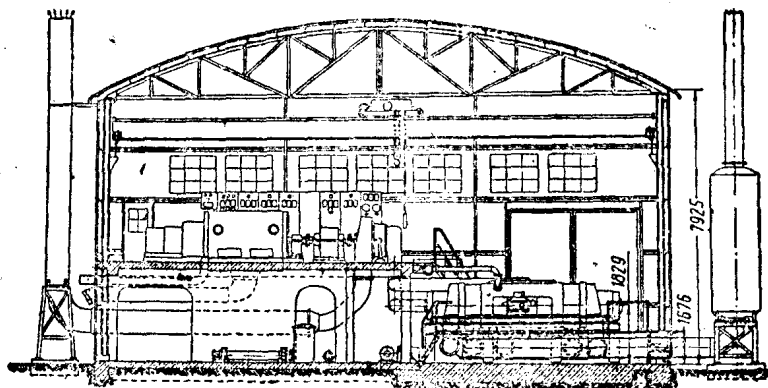


图 1 功率为 5,000 瓩,装有自由活塞发生器-燃气轮机联合热力装置的电站

图 2 列举了电站用功率为 1,000 瓩的联合热力装置。自由活塞燃气发生器、减速器和发电机安装在不大的机架上。辅助机组可以安放在混凝土地面上或机器房的地板上，并具有独立的传动

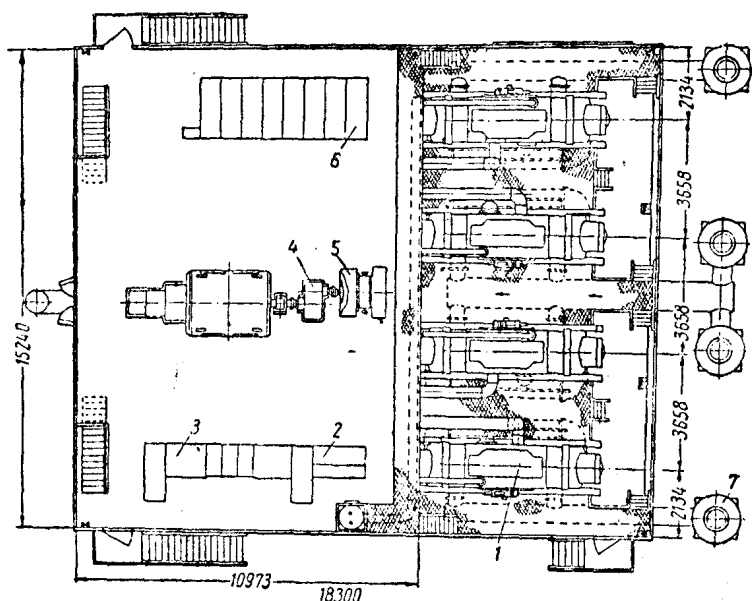


图 2 用于功率为 1,000 瓩电站的自由活塞发生器-燃气
轮机联合热力装置

1—自由活塞燃气发生器；2—操纵台；3—辅助机组；4—减速器；
5—燃气轮机；6—配电盘；7—消音器

机构。减速器属普通型式，其传动比为 4:1。燃气轮机具有简单而比较轻的结构。这种燃气轮机之一（“Cooper-Bessemer”公司出产）示于图 3，其外壳的上半部已经取下。这台燃气轮机具有 5 个反冲级。燃气轮机工作叶轮的转速为每分钟 14,400 转。当燃气轮机的效率等于 85%、燃气消耗量为 4 公斤/秒时，主轴上的额定功率为 1,500 马力。燃气轮机的转子用钢料整体锻制。燃气轮机的叶片采用精密铸造，可以互换。燃气轮机主轴的两个轴承和一个止推轴承采用普通结构。

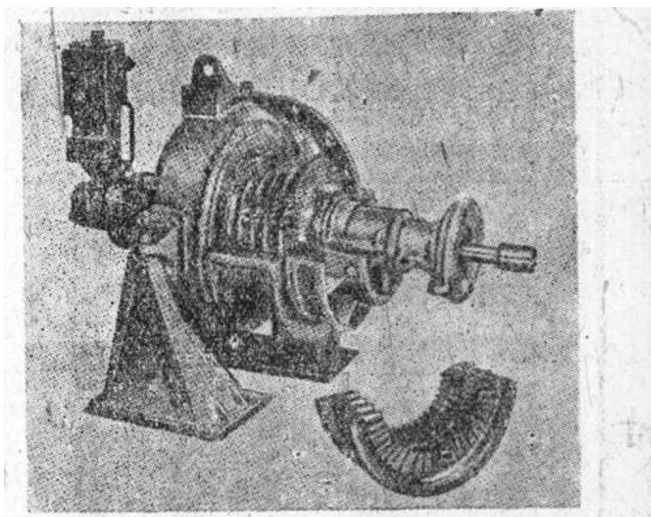


图 3. 自由活塞发生器联合热力装置中的燃气轮机

燃气轮机带有专门装置，以防止转速的过分提高而超过容许范围。当燃气轮机转速过分增高时旁通阀便打开，燃气由高压管道直接排入大气中。这个装置还附加一个关闭燃油供应的阀门，因此，可使燃气轮机较快地卸去负荷〔25〕。

发电机是高转速的，结构紧凑，额定转速为每分钟 3,600 转。

由于整个设备仅需具有轻型的基础以及由于它的紧凑性，只要建筑便宜的电站厂房就可以安装这种装置，厂房的高度从地板起约 2.1 公尺，这样已完全足以拆除自由活塞发生器的所有主要部件。燃气轮机的安装位置距自由活塞发生器极近。

联合装置的操纵比较简单，操纵自由活塞发生器的唯一控制系统是由安装在燃气轮机前端的调速器传动的。

这样的联合装置是小功率的，以用来作为顶值负荷时的辅助或备用装置最为适宜。此外这种紧凑的、经济的电站主要适用于供应农村所需的电能，特别适用于垦荒地区。