

燃气轮机的检修

任其智 编著



机械工业出版社

前 言

燃气轮机是一种新型的动力机械，它具有起动快、建设周期短、排气污染轻、占地面积小和耗水量少等显著优点，近来发展非常迅速。在西方一些发达国家，发电用燃气轮机的装机容量占发电总装机容量的一半左右。

对于我国目前缺电严重且峰谷用电量相差很大的情况，燃气轮发电机组作为调峰机组，具有其他发电机组无法比拟的优越性。燃气轮机在改造热效率低、排气污染严重且耗水量很大的中、小型电厂的工作中，也占有很重要的地位，所以燃气轮机在我国的应用具有非常光明、广阔的前景。

改革开放以来，我国陆续建造了几个燃气轮机电厂。在西气东输和大规模使用液化天然气的形势下，目前正在大规模地建造燃气轮机电厂。因此燃气轮机的检修也就很自然地提上了议事日程，为适应这种形势，作者根据十多年的工作经验写成了此书，以供同仁及有志于从事燃气轮机检修工作的人士参考。由于作者的知识水平及经历有限，不当和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。在本书的写作和出版过程中，得到了南京汽轮电机（集团）有限责任公司的大力帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

南京汽轮电机（集团）有限责任公司 任其智

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 燃气轮机应用的现状及发展前景	1
1.2 燃气轮机检修的重要性	2
1.3 检修计划的制定及检修周期的确定	2
1.4 检修的分类	7
1.4.1 燃烧系统检查 (亦称小修)	8
1.4.2 热通道检查 (亦称中修)	14
1.4.3 整机检查 (亦称大修)	14
第 2 章 燃气轮机的工作原理和结构	18
2.1 燃气轮机的工作原理	18
2.2 燃气轮机的结构	19
2.2.1 压气机	19
2.2.2 燃烧室	23
2.2.3 透平	25
2.2.4 与燃气轮机本体配套的主要辅助设备	28
2.2.5 与燃气轮机本体配套的主要辅助系统	31
第 3 章 燃气轮机的检修方法	67
3.1 检修前的准备工作	67
3.1.1 监理单位和检修队伍的确定	67
3.1.2 备品备件的准备	67
3.1.3 专用工具的准备	68
3.1.4 技术准备	69
3.2 检修过程中应注意的事项	70
3.2.1 检修过程中应注意的关键部位	70
3.2.2 保证检修质量的措施	74
3.3 检修后的验收	75
3.4 检修报告的编写	75
第 4 章 9E 燃气轮机的大修工艺	77
4.1 拆卸部分	77

4.2 检查部分	87
4.2.1 主机部分	87
4.2.2 辅机系统的拆卸、检查和复装	96
4.3 复装部分	100
4.4 后记	112
附录	113
附录 A 缝隙式火焰筒的检查标准	113
附录 B 鱼鳞孔型燃烧室头部端盖的检查标准	114
附录 C 联焰管和弹性卡板的检查标准	115
附录 D 过渡段的检查标准	115
附录 E 导流衬套的检查标准	116
附录 F 点火火花塞的检查标准	116
附录 G 检查报告范例	117
参考文献	175

第1章 概述

1.1 燃气轮机应用的现状及发展前景

燃气轮机作为新型的动力设备,由于具有结构紧凑,单位功率重量轻,运行平稳且安全可靠,可以大型化且热效率较高,可以快速启动和带负荷等显著的优点,受到世人的广泛关注,应用的范围越来越广。在航天航空领域里是独一无二、不可替代的动力设备;在航海和陆上交通运输领域里也占有越来越重要的地位,在一些现代化的舰船上,均采用燃气轮机作动力设备。陆上交通运输工具,如汽车、火车机车及军用坦克上也采用燃机作动力设备;在发电领域里,由于燃气轮机电厂占地面积少、建设周期短、水的消耗量少、排气污染轻受到人们的广泛关注,尤其是以燃气轮机为主组成的燃气—蒸汽联合循环电厂不仅排气污染轻,而且其热效率已达到和超过了最新型的超超临界参数的蒸汽轮发电机组,所以在发电行业里的应用也越来越多,已动摇了蒸汽轮发电机组在发电行业的霸主地位。可以预期,在不久的将来必定会取代蒸汽轮发电机组在发电行业的霸主地位。

据 2000 年的统计,全世界新增发电容量中,燃气轮机及其联合循环已占到 35%~36%;在一些西方发达国家里,这个比例还要高,例如 2000 年美国的新增发电容量中,燃气轮机及其联合循环占 48%,传统的蒸汽轮发电机组占 48%;而在德国,燃气轮机及其联合循环在新增发电容量中占到 2/3。由此可见,在世界范围内燃气轮机及其联合循环已成为火电发展的重要方向。

由于以前的燃气轮机及其联合循环电厂以石油及其制品和天然气为燃料,大大制约了燃气轮机的应用和发展,但随着近期煤气化联合循环技术的发展和成熟,燃气轮机不仅可以以油气为燃料,而且可以以中低热值煤气为燃料,这就为燃气轮机的大发展和更广泛的应用奠定了坚实的基础。特别是以燃气轮机为主组成的煤气化联合循环,可以用来改造现有的燃煤的蒸汽轮发电机组,在继续以煤为燃料的同时,又解决了严重的排气污染,还可以增加出力和热效率,这为改造能耗高、排气污染严重的燃煤的蒸汽轮发电机组提供了非常好的选择。此外,燃气轮机还在一些新型发电技术中占据着很重要的地位,如湿空气透平(HAT)循环和燃料电池—燃气轮机循环等新型发电技术,这将是今后发电技术发展的主要方向之一。由此可知,燃气轮机具有非常光明的发展前景,其应用会越来越广泛。

1.2 燃气轮机检修的重要性

随着燃气轮机的广泛应用,燃气轮机的检修也就很自然地越来越受到人们的关注。尽管燃气轮机的工质的工作压力不是很高,基本上在 30bar 之内,但其工质的温度很高,E 型技术燃气轮机的进气温度为 1100℃,而 G 型、H 型技术燃气轮机的进气温度为 1430℃ 左右;并且是高速旋转式机械。在此条件下工作的燃气轮机除了必须加强日常的运行维护之外,还必须定期进行检修,以确保机组能安全的运行。

燃气轮机的燃料,可以是天然气,也可以是轻油和重油或原油,甚至是低热值煤气。根据所用燃料的不同,燃气轮机的维护和定期检修的内容和工作量也不同。由于燃气轮机的工作温度很高,又是高速旋转式机械,其工作条件是相当恶劣的,尽管在燃烧系统和热通道部件的选材、加工工艺、涂层及冷却等诸多方面采取了很多抗高温的措施,但在燃气轮机的运行中仍不时发生因高温而引发的各种事故,所以对燃气轮机的定期检修规定了明确且严格的时间周期和具体的检修内容,要严格按照燃气轮机制造厂商提供的技术文件和有关的规范要求进行施工,以期通过检修解决机组运行中发现的问题和虽没有发现但已存在的威胁机组安全运行的隐患,确保机组的安全运行。同时,合理而科学的检修还可以延长燃气轮机各零部件的使用寿命,提高燃机运行的经济性。

1.3 检修计划的制定及检修周期的确定

首先要说明的是,国内燃气轮机电厂中所使用的燃气轮机,绝大多数是 GE 系列的产品,所以我们所能看到的技术文件也基本上是 GE 的,故而我们的叙述也是以 GE 的产品为主。

由于燃气轮机所使用燃料的多样性和运行方式的多样化,会对燃气轮机检修计划的制定产生很大的影响。影响燃气轮机检修计划的主要原因如图 1-1 所示,而燃气轮机的运行方式又将决定每一个因素的轻重。

燃气轮机中特别需要关注的是那些与燃烧过程有联系的及暴露在从燃烧系统中排出的高温烟气中的部件,即火焰筒、联焰管和过渡段等燃烧系统部件及透平喷嘴、透平护环和透平动叶等热通道部件。由于它们在腐蚀性的高温环境里工作,所以发生故障的几率也就比较高,检修中应予以充分的关注。由于材料、加工工艺及涂层等原因,这些高温部件价格很昂贵,是检修的备品备件费用中的主要部分,所以燃气轮机的用户们应对机组的运行予以应有的注意,尽可能地避免超温运行,避免尖峰负荷运行,每次开机尽可能地多运行一些时间,尽量减少超

温和频繁的交变热应力对这些高温部件所造成的损害，以延长这些高温部件的使用寿命，提高电厂的经济效益。GE 重型燃气轮机的基本设计和检修的建议是为了达到以下目标：

- (1) 检修和大修之间的最长运行周期；
- (2) 现成在位检查和维修；
- (3) 使用当地的技术力量进行拆卸、检查和复装。

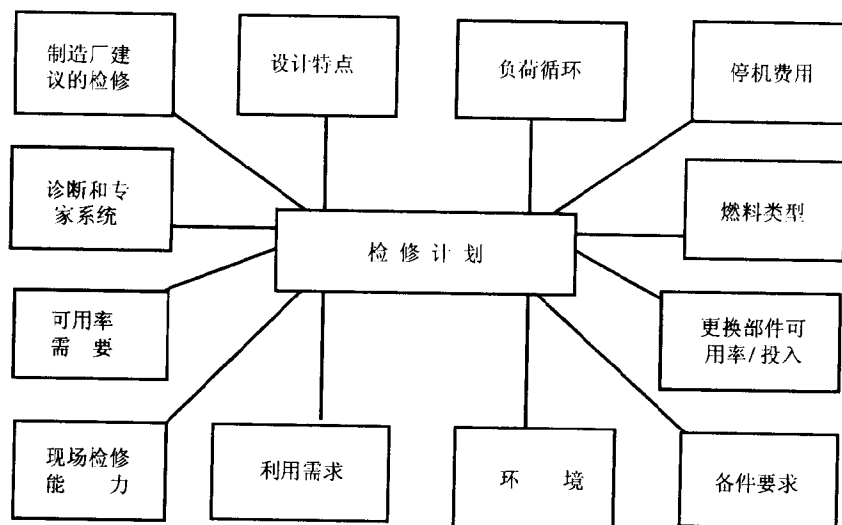


图 1-1 影响检修计划的主要因素

燃气轮机检修计划的制定和检修周期的确定就是根据图 1-1 所示的影响检修计划的主要因素和机组的运行方式来决定的。在图 1-1 所示的影响检修计划的主要因素中，起主导作用的——也就是影响检修和设备寿命的——因素是机组的运行方式、燃烧温度、燃料和注水/蒸汽。对连续负荷运行的机组，影响机组寿命的主要因素是氧化腐蚀和蠕变，而影响周期负荷运行（调峰）机组寿命的主要是热力机械疲劳；燃料对机组检修周期的影响是显而易见的，因为燃料不同，燃料中对金属材料有害的杂质的含量就不同，所以对机组的燃烧系统部件、热通道部件及透平排气部件所造成的损害也就不同，在图 1-2 中列出了各有关因素的热通道（喷嘴和动叶片）检修系数。

图 1-3 上所示曲线为燃料对检修系数影响的曲线，由于燃料类型的不同，燃料中所含氢的重量百分比也不同，对检修的影响自然也就不同。由图中曲线可以看出，燃料中所含氢的重量百分比越小，检修的周期就越短，反之检修周期就越长。

典型的最大检修周期 (MS6B/MS7EA)

热通道检修 24000h 或 1200 次启动

整机检修 48000h 或 2400 次启动

以运行小时数或启动次数为基准 (先到者为准) 影响检修的系数

运行时间系数

1. 燃料

a. 天然气 1.0

b. 轻油 1.5

c. 原油 2.0~3.0

d. 渣油 3.0~4.0

2. 尖峰负荷 6.0

3. 水/蒸汽注入:

a. 干控 1.0 (GTD-222)

b. 湿控 1.9 (5% 的水, GTD-222)

启动次数系数

1. 满负荷跳闸 8.0

2. 快速带负荷 2.0

3. 紧急启动 20.0

图 1-2 热通道 (喷嘴和动叶片) 检修系数

GE 所推荐的表 1-1 中的检修周期是以烧天然气、基本负荷运行且没有注水或注蒸汽作为基本条件的, 当机组的实际运行情况与上述基本条件不同时, 机组的真实的检修周期应由推荐的检修周期除以一个大于 1 的检修系数, 而检修系数的大小由燃料类型、尖峰负荷运行的时间、注水/蒸汽的情况、正常负荷启动停机的循环次数、部分负荷启动停机的次数、紧急启动的次数、跳闸次数等因素确定。图 1-4 是以运行时数为基准的热通道检修周期, 图 1-5 是以启动次数为基准的热通道检修周期, 这两种热

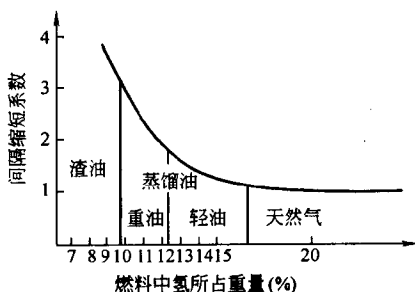


图 1-3 燃料类型对检修的影响

通道的检修周期无论哪一种先达到, 均应进行热通道的检修。图 1-6 是以运行时数为基准的转子检修周期, 图 1-7 是以启动次数为基准的转子检修周期, 跟热通道的检修一样, 无论哪一种周期先达到, 均应进行转子的检修。

表 1-1 推荐的检修周期

检测形式	(运行时间/h)/启动次数			
	MS6B	MS7E/EA	MS9E	MS6F ^① /7F/9F
燃烧系统	12000/1200	8000/800	8000/800	8000/400
热通道	24000/1200	24000/1200	24000/900	24000/900
整机	48000/2400	48000/2400	48000/2400	48000/2400
转子				144000/5000

① 转子检修周期不适用于 MS6F 机组。

$$\text{检修周期 (运行小时)} = \frac{24000}{\text{检修系数}}$$

$$\text{其中检修系数} = \frac{\text{因素时间}}{\text{实际时间}}$$

$$\text{而因素时间} = (K + M + I)(G + 1.5D + A_1H + 6P)$$

G = 用天然气每年按基本负荷运行的时数

D = 用轻油每年按基本负荷运行的时数

H = 用重油每年按基本负荷运行的时数

A_1 = 重油严重系数 (渣油 $A_1 = 3 \sim 4$, 原油 $A_1 = 2 \sim 3$)

P = 每年尖峰负荷运行的时数

I = 水/蒸汽注入占进气流量的百分比

M 和 K = 水/蒸汽注入常数

M	K	控 制	蒸汽注入量	N2/N3 材料
0	1	干	< 2.2%	GTD-222/FSX-414
0	1	干	> 2.2%	GTD-222
0.18	0.6	干	> 2.2%	FSX-414
0.18	1	湿	> 0	GTD-222
0.55	1	湿	> 0	FSX-414

图 1-4 以运行小时为基准的热通道检修周期

$$\text{检修周期 (起动次数)} = \frac{S}{\text{检修系数}}$$

$$\text{其中检修系数} = \frac{\text{因素次数}}{\text{实际起动次数}}$$

$$\text{而因素次数} = 0.5NA + NB + 1.3NP + 20E + 2F + \sum_{i=1}^n a_{Ti}T_i$$

$$\text{实际起动次数} = NA + NB + NP + E + F + T$$

S = 因机组型号而异的以起动次数为基准的最大检修周期

NA = 每年部分负荷起动停机循环次数 (负荷 60%)

NB = 每年正常基本负荷起动停机循环次数

NP = 每年尖峰负荷起动停机循环次数

E = 每年紧急起动次数

F = 每年快速升负荷起动次数

T = 每年跳闸次数

a_T = 跳闸严重系数 = f (负荷) (见图 1-8)

n = 跳闸种类数 (如满负荷, 部分负荷等)

机型	MS6B/MS7EA	MS6FA	MS9E	MS7E/7FA/9F/9FA
S	1200	1200	900	900

图 1-5 以起动次数为基准的热通道检修周期

转子检修周期(运行时数) = $\frac{144000}{\text{检修系数}}$

其中检修系数 = $\frac{H + 2P + 2TG}{H + P}$

而 H = 基本负荷运行时数

P = 尖峰负荷运行时数

TG = 盘车时数

图 1-6 以运行时数为基准的转子检修周期

转子检修周期(起动次数) = $\frac{5000 \text{ (不要达到 5000 次)}}{\text{检修系数 (检修系数} \geq 1)}$

其中检修系数 = $\frac{F_h N_h + F_{w1} N_{w1} + F_{w2} N_{w2} + F_c N_c + F_t N_t}{N_h + N_{w1} + N_{w2} + N_c}$

	快速带负荷	正常带负荷
F_h ——热起动系数(停机 1~4h)	1.0	0.5
F_{w1} ——暖起动 1 系数(停机 4~20h)	1.8	0.9
F_{w2} ——暖起动 2 系数(停机 20~40h)	2.8	1.4
F_c ——冷起动系数(停机超过 40h)	4.0	2.0
F_t ——甩负荷跳闸系数	4.0	4.0

注：在停机后 1h 内重新启动时用冷起动的转子维修系数

N_h ——热起动次数

N_{w1} ——暖起动 1 次数

N_{w2} ——暖起动 2 次数

N_c ——冷起动次数

N_t ——跳闸次数

图 1-7 以起动次数为基准的转子检修周期

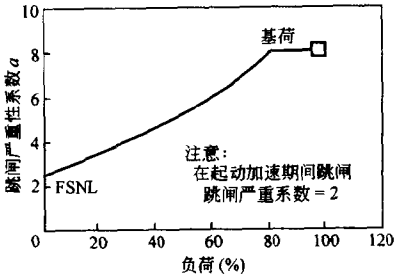


图 1-8 甩负荷跳闸的检修系数

根据图 1-4 ~ 图 1-7 就可以确定热通道和整机（即大修）的检修周期，但燃烧系统的检修周期没有给出这样的形式，对于燃烧系统设备的时间、燃料、稀释剂种类和排放水平都分别给出了建议，对于特定应用方式的机组的燃烧系统检修周期可由燃气轮机制造厂商的现场服务代表给予推荐，或参照 MS7001EA 燃烧系统检修周期的例子（由表 1-2）来确定。

制定检修计划和确定检修周期时除了根据燃气轮机制造厂商提供的技术文件和推荐的检修周期之外，还应在机组停机时利用孔探仪对机组的实际运行状况进行检查，综合考虑孔探仪检查的情况和机组在实际运行的过程中发现的问题来确定具体的检修日期和检修范围，以确保机组运行的安全可靠和降低检修的费用。

表 1-2 推荐的 MS7001EA 燃烧系统检修周期

燃烧室设计	NO _x 排放 (× 10 ⁻⁶)	稀释剂	燃料	
			天然气	轻油
			(运行时数/h)/启动次数	
标准燃烧室	65	干	8000/800	8000/800
		蒸汽	—	8000/400
		水	—	6500/300
	42	蒸汽	8000/400	3000/150
		水	6500/300	1500/100
多喷嘴燃烧室	42	蒸汽	—	6000/300
		水	—	6500/300
	25	蒸汽	8000/400	—
		水	8000/400	—
干低 NO _x	25	干	8000/400	—

注：Extendor 燃烧系统耐磨件使燃烧检修延至 24000h。

1.4 检修的分类

由于燃气轮机各部分工作温度的高低不同，所以检修的周期也不同，通常可

将燃气轮机的检修分成以下三种不同形式。

1.4.1 燃烧系统检查（亦称小修）

由于燃烧系统是燃气轮机中工作温度最高的，所以燃烧系统的部件出故障的几率也就多些，燃烧系统的检查，即小修的周期也就最短。燃烧系统检查的目的是消除燃烧系统中影响机组安全运行的因素。根据机组型号的不同，按以烧天然气、基本负荷运行且没有注水或注蒸汽作为基本条件所推荐的检修周期也不同，详见表 1-1。燃烧系统检修的范围包括从燃料喷嘴开始到过渡段为止的整个燃烧系统的所有部件，详见图 1-9。

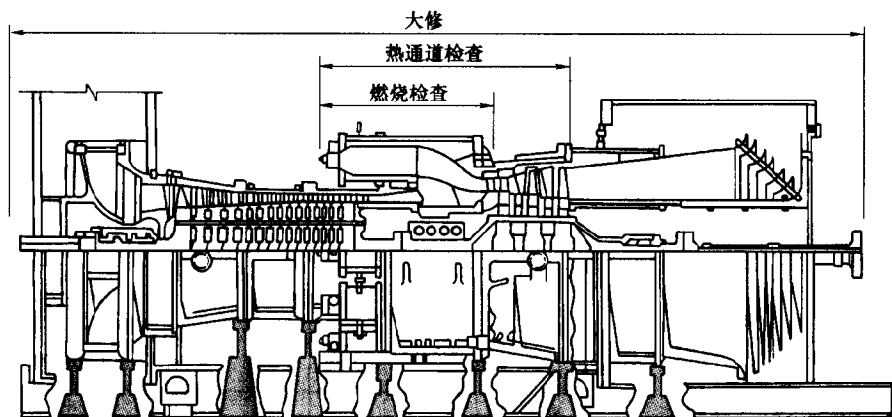


图 1-9 各种检修的工作范围

燃烧系统是燃气轮机的各组成部分中变化最大、型式最多的一个组成部分，所以其检修的方式方法和技术要求的变化也最多。如 GE 系统的燃气轮机基本都是采用逆流分管式的燃烧系统，如图 1-10 ~ 图 1-12 所示，只是由于机组容量的不同，分管式燃烧室的数量有所不同而已，如 MS6001B 型燃气轮机有 10 个分管式燃烧室，而 MS9001E 型燃气轮机有 14 个分管式燃烧室；德国 Siemens 公司生产的燃气轮机多采用圆筒式燃烧室和环形燃烧室，如图 1-13 是双立式的圆筒形燃烧室，图 1-14 是双卧式的圆筒形燃烧室，图 1-15 则是环形燃烧室；ABB 公司生产的燃气轮机采用圆筒形燃烧室和二次燃烧的环形燃烧室，如图 1-16 是立式的单圆筒形燃烧室，图 1-17 是二次燃烧的环形燃烧室，这种结构形式虽增加了转子的轴向长度，但可以降低燃气轮机的初温，也就是降低燃烧温度，从而达到降低 NO_x 排放造成的污染且保持较高的机组热效率。由此可见，燃气轮机燃烧系统的变化还是很大的，因此燃烧系统检修的方式方法也应有很大的差异。

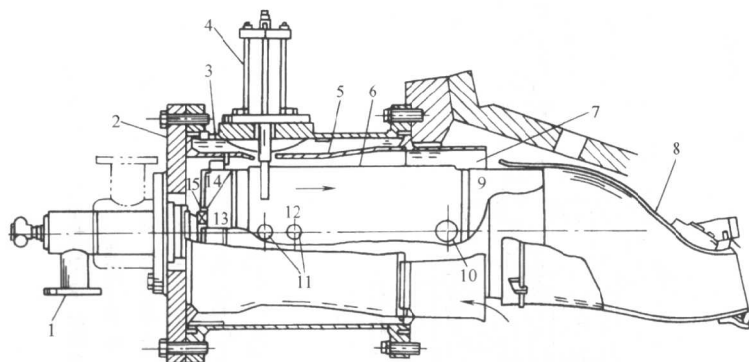


图 1-10 MS6001 系列燃气轮机上采用的分管型燃烧室的总成图

- 1—燃料喷嘴 2—盖板 3—外壳 4—点火器 5—导流衬套 6—火焰筒 7—环腔
8—过渡段 9—混合区 10—混合射流孔 11—一次射流孔 12—燃烧区
13—过渡锥顶 14—配气盖板 15—旋流器

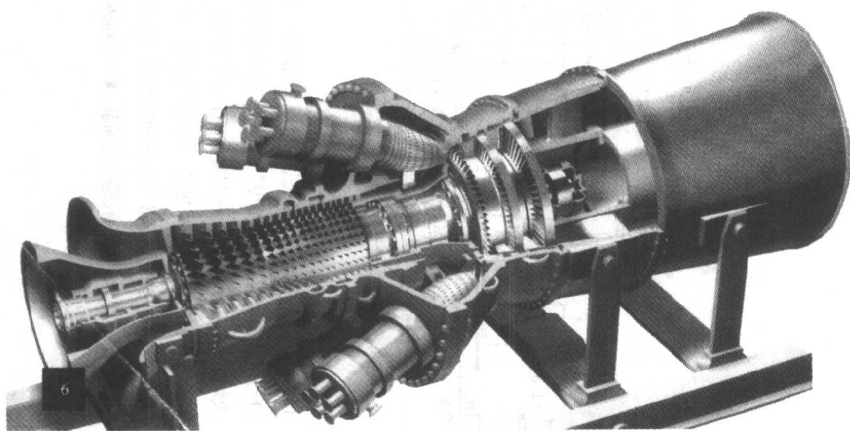


图 1-11 6FA 燃气轮机的示意图

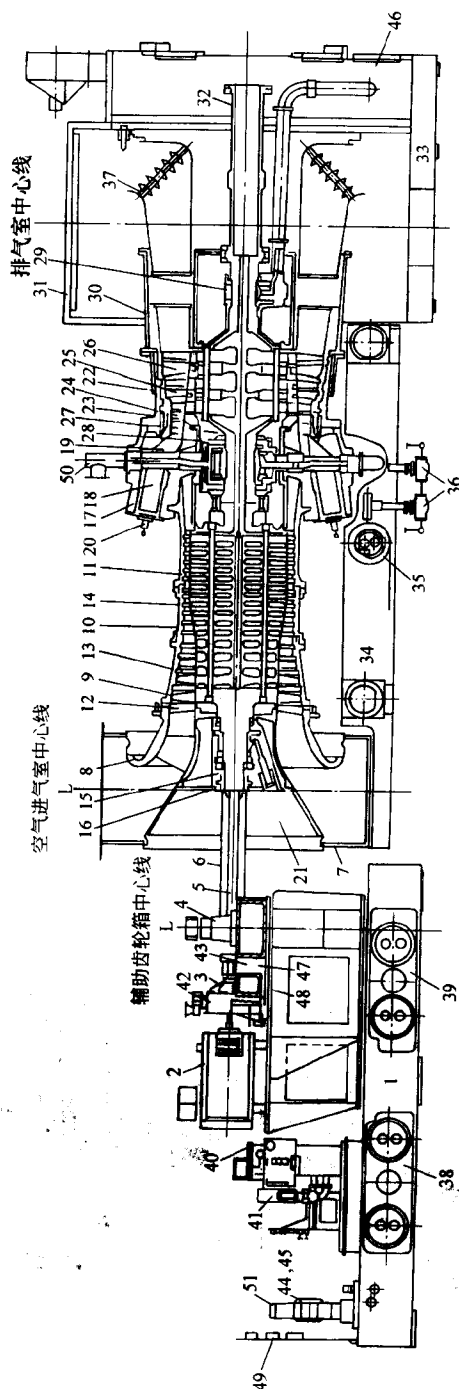
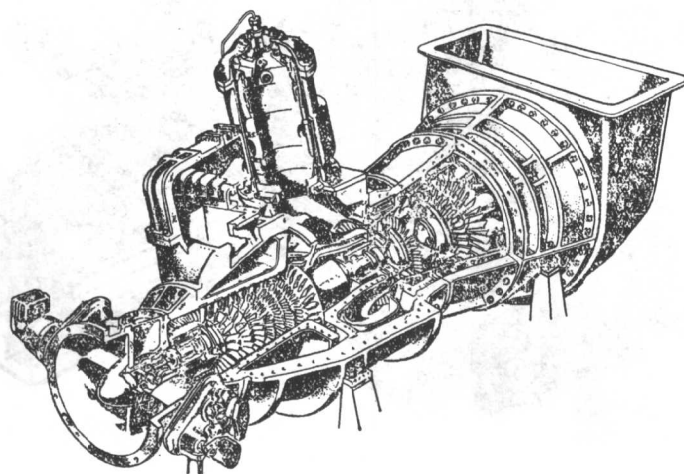
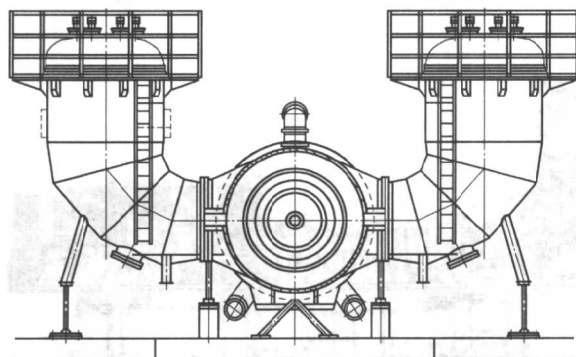


图 1-12 9E 型燃气轮机的结构图

1-辅助底盘 2-启动电动机 3-液力变扭器 4-辅助齿轮箱 5-辅助联轴器 6-辅助联轴器罩壳 7-进气室 8-压气机进气缸 9-压气机前缸 10-压气机后缸 11-压气机排气缸 12-进口可转导叶 13-压气机叶片 14-压气机转子 15-1°轴 16-高压磁性传感器 17-燃烧室外缸 18-火焰筒 19-过渡段 20-燃料喷嘴 21-进口圆锥 22-透平级喷嘴 23-透平级喷嘴 24-透平级喷嘴 25-透平级喷嘴 26-透平级喷嘴 27-透平级喷嘴 28-2°轴 29-3°轴 30-排气室 31-排气室 32-排气室 33-透平级喷嘴 34-透平级喷嘴 35-透平级喷嘴 36-透平级喷嘴 37-透平级喷嘴 38-透平级喷嘴 39-透平级喷嘴 40-透平级喷嘴 41-透平级喷嘴 42-透平级喷嘴 43-透平级喷嘴 44-透平级喷嘴 45-透平级喷嘴 46-透平级喷嘴 47-透平级喷嘴 48-透平级喷嘴 49-透平级喷嘴 50-透平级喷嘴 51-透平级喷嘴



a)



b)

图 1-13 双立式圆筒形燃烧室的结构

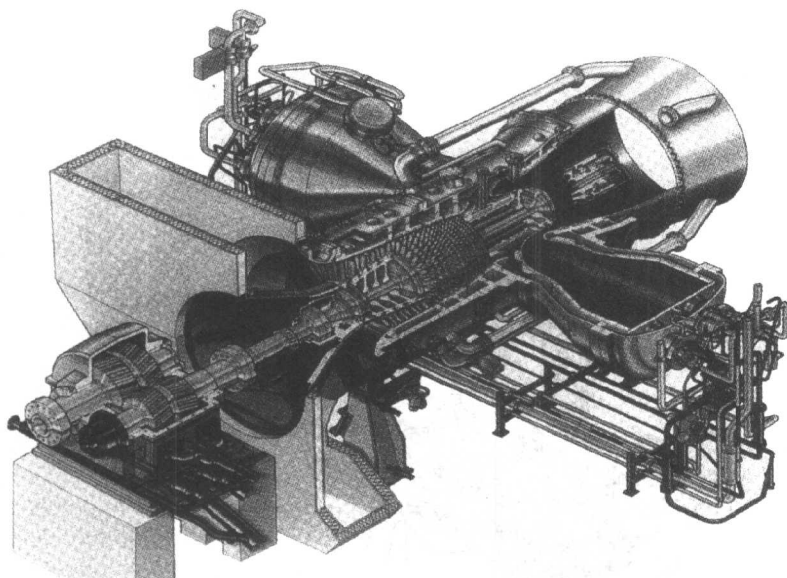


图 1-14 双卧式圆筒形燃烧室的结构

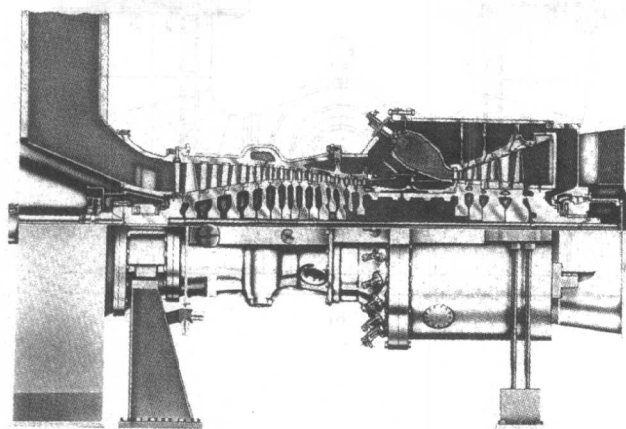


图 1-15 环形燃烧室的结构

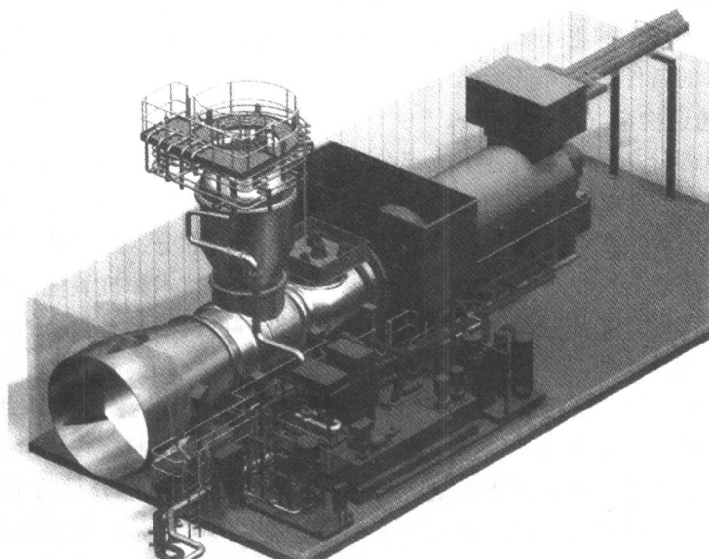


图 1-16 单立式圆形燃烧室的结构

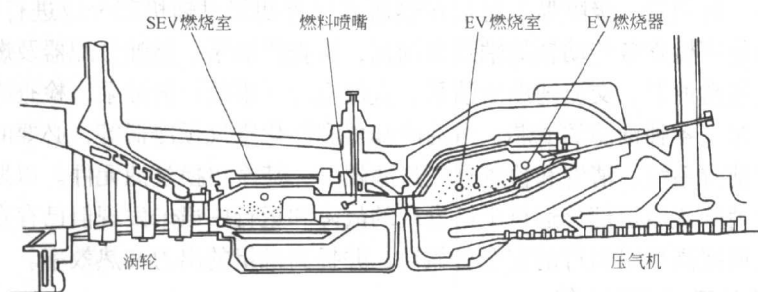


图 1-17 二次燃烧的环形燃烧室的结构

目前,我国各燃机电厂使用的燃气轮发电机组,无论是引进机组还是国产机组,主要是以 GE 系列的燃气轮机为主。根据 GE 系列燃气轮机的分管式燃烧系统,其检修的主要工作是拆下燃料喷嘴,打开燃烧室端盖,拆出联焰管、火焰筒、过渡段和导流衬套,重点检查燃料喷嘴、火焰筒、过渡段、联焰管、导流衬套、单向阀、火花塞和火焰探测器等零部件,检查其积碳、结垢、烧蚀、烧融、