



燃气轮机与蒸汽轮机

翁史烈 主编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是作为适用于热动力装置专业的大学本科生教材而编写的。其目的就在于把本学科的基础知识介绍给学生，应用工程热力学和流体力学的基本原理，系统阐述蒸汽轮机和燃气轮机主要部件的有关理论以及它们工作时所遵循的基本规律，为掌握这些部件的性能和蒸汽轮机、燃气轮机的特性提供了理论依据。本书尽可能地把蒸汽轮机和燃气轮机在原理上的共同点溶为一体，进行统一的阐述，同时专辟章节分别介绍它们各自的特点。编者希望通过较少的篇幅，使读者对热力叶轮机械学科有一个全面而统一的认识。

本书可用作大专院校热动力装置的教材，也可供能源、电力、动力、交通等领域中从事设计和运行、维护的工程技术人员参考。

22 19/32

燃气轮机与蒸汽轮机

上海交通大学出版社·出版

(上海市华山路 1954 号 邮政编码 200030)

新华书店上海发行所·发行

常熟市印刷二厂·印刷

开本: 787×1092(毫米) 1/16 印张: 14.5 字数: 354000

版次: 1996 年 7 月第 1 版 印次: 1996 年 7 月第 1 次

印数: 1—1500

ISBN 7-313-01653-0/TK·046 定价: 11.60 元

前 言

热力涡轮机包括蒸汽轮机与燃气轮机。作为动力机械,热力涡轮机在能源利用和能量转换中占有非常重要的位置,从发电、供热、能源勘采,一直到海、陆、空运载工具的推进领域,已得到非常广泛的应用。可以说,没有涡轮机就没有现代的电力工业;没有涡轮机,就没有现代的航天、航空、航海事业。

涡轮机是许多学科结合的产物,学习掌握涡轮机应该具备热力学、传热学、气动力学、材料、工艺、机械学(包括强度、振动等)、自动控制等多方面的基础。从当前科学发展的趋势看,涡轮机理论的内涵可以分为三大体系:第一个体系是以热力学、气动力学为基础的涡轮机工作的基本原理和气动热力设计;第二个体系是以热力学、气动力学、控制理论、计算机科学为基础的涡轮机动态性能分析、动态建模、动态仿真、最优控制和以热参数为监控对象的故障诊断、专家系统,有时也称为涡轮机械的动态学;第三个体系是以材料科学、强度振动、机械制造为基础的涡轮机结构和工艺设计。作为本科生教材,本书的重点将以工程热力学和流体力学为基础,系统地阐述涡轮机及其主要部件的工作原理,再辅之以必要的数学描述,使广大学生从物理概念的层面上对气体流动、能量转换、损失形成等重要过程有一个较为清晰的了解。

本书也对热力循环、气动计算、动态分析等方面的新发展予以了注意,力求介绍本领域中的最新成就,但限于篇幅,不可能讨论所有的最新技术。在学习本课程的基础上,学生可以选择上述三个体系之一,通过学习后继课程或自学相关的专著向纵深发展。

本书由翁史烈教授主编,并撰写了第七章;吴铭岚教授编写了第二章、第四章和附录;张百年教授编写了第八章;王永泓教授编写了第一章和第三章;邹介棠教授编写了第五章和第六章。

本书为高等院校热能动力机械专业的教学用书;同时对从事热能工程、动力工程设计及研究和从事相关工程设备运行、维护的工程技术人员也有参考价值。

书中不足与错误在所难免,恳请读者指正。

目 录

第1章 概述	(1)
§1-1 燃气轮机和蒸汽轮机在国民经济中的地位.....	(1)
§1-2 燃气轮机和蒸汽轮机的发展简史.....	(2)
§1-3 燃气轮机和蒸汽轮机的总体结构.....	(5)
第2章 叶轮机械气动力学基本方程	(17)
§2-1 状态方程.....	(17)
§2-2 连续流方程.....	(18)
§2-3 能量方程式(热焓形式的能量方程).....	(19)
§2-4 柏努利方程(机械能形式的能量方程).....	(21)
§2-5 运动方程.....	(24)
§2-6 动量矩方程.....	(24)
第3章 燃气轮机和蒸汽轮机装置的热力循环	(27)
§3-1 装置的热力过程及性能指标.....	(27)
§3-2 燃气轮机的简单循环.....	(31)
§3-3 燃气轮机的回热循环.....	(36)
§3-4 燃气轮机的间冷和间冷回热循环.....	(39)
§3-5 蒸汽轮机的中间再热循环.....	(43)
§3-6 蒸汽轮机的给水回热循环.....	(46)
§3-7 燃气-蒸汽联合循环.....	(54)
§3-8 回注蒸汽燃气轮机循环.....	(57)
第4章 涡轮	(63)
§4-1 基元级的工作原理.....	(63)
§4-2 涡轮叶栅的气动特性.....	(92)
§4-3 涡轮级扭转叶片的计算.....	(107)
§4-4 涡轮特性.....	(116)
§4-5 多级涡轮.....	(120)
第5章 压气机	(130)
§5-1 绪论.....	(130)
§5-2 轴流式压气机.....	(131)
§5-3 离心式压气机.....	(140)
§5-4 压气机的特性.....	(145)
第6章 燃烧室	(155)
§6-1 燃烧室的基本性能要求.....	(155)
§6-2 燃烧室的类型.....	(157)

§6-3	燃烧室的工作过程及其功能部件	(160)
§6-4	燃烧室的特性	(163)
第 7 章	涡轮机的变工况性能	(166)
§7-1	燃气轮机的组合形式	(166)
§7-2	燃气轮机变工况性能分析的一些概念	(167)
§7-3	分轴燃气轮机装置的变工况特性	(170)
§7-4	多轴燃气轮机装置的变工况特性	(174)
§7-5	燃气轮机装置的过渡过程	(177)
§7-6	蒸汽涡轮的变工况工作	(179)
§7-7	配汽方式对汽轮机变工况的影响	(182)
§7-8	滑压方法的变工况特点	(187)
§7-9	涡轮机的数学模型及其解法	(191)
第 8 章	涡轮机的调节	(197)
§8-1	涡轮机自动控制的基本内容及其发展	(197)
§8-2	涡轮机转速调节系统基本原理	(198)
§8-3	涡轮机的调节性能	(200)
§8-4	汽轮发电机组的运行方式	(203)
§8-5	燃气轮机的辅助调节器	(206)
附录	叶轮机械三元流动理论及其计算方法	(209)
§1	三元流动的基本方程	(209)
§2	求解三元流动问题的计算方法	(213)

第1章 概述

§1-1 燃气轮机和蒸汽轮机在国民经济中的地位

燃气轮机是利用燃料的化学能转变为燃气的热能，再经燃气透平时将热能转变为机械能和电能的原动机。它采用空气而不用水蒸汽作工质，故可省去锅炉、冷凝器、给水处理等大型设备，因此燃气轮机装置比蒸汽轮机装置重量轻，体积小。从装置经济性看，目前燃气轮机装置效率已达40%，比较复杂的联合循环效率可达到40%~50%，已可与柴油机的经济性相比美。此外，燃气轮机还具有起动快、维修方便、运行可靠、自动化程度高、造价低等优点。

和蒸汽轮机装置相比，它的缺点是：

- (1) 单机功率比较小；
- (2) 运行寿命比较短；
- (3) 对燃料种类有较高的要求。

但这些缺点正在逐步克服。例如蒸汽-燃气联合的发电装置单套功率可达50~60万kW。又如早期的燃气轮机寿命仅几百小时，但现在的产品寿命已能长达数万小时，美国PW公司制造的FT8燃气轮机的寿命可超过20年。再如，燃用柴油或重油的机车燃气轮机在国内外早已试制成功。我国在1987年初制造成功的长征2型燃气轮机机车就燃用重油。这就大大节省了燃料费用。随着燃气轮机缺点的不断消除，它的固有优点也就更突出了。因此，近20年来燃气轮机在许多领域内得到了迅猛的发展。

燃气轮机由于能快速启动，因此在电站中常用作承担尖峰负荷和半尖峰负荷的机组或备用机组。在许多场合，燃气轮机已被公认为是比较适合在小功率电站中用作承担基本负荷的机组。由于燃气轮机体积小，重量轻，维护简单，机动性好，因此也常用作卡车移动式电站或列车电站。在船舶工业领域，燃气轮机作为舰艇的加速机组和水翼船、气垫船等的主动力，已占压倒优势，同时也被广泛用作舰艇主机、巡航机及油船动力等。在航空工业领域，它更占绝对优势。可以说，没有任何一种动力机械有这么多的应用方式，所以燃气轮机在国民经济中起着极其重要的作用。

蒸汽轮机是利用蒸汽的热能来作功的旋转式原动机。与其他热力发动机(如燃气轮机、柴油机等)相比，蒸汽轮机装置效率低一些，为25%~40%。但它具有单机功率大(可达100万kW以上)，运行可靠，以及能使用廉价燃料(煤)等优点。因而在中心电站发电和大型船舶及军舰的推进动力中得到极为广泛的应用。在冶金、化工等部门，也常以汽轮机驱动各种从动机械，如泵、风机、高炉风机、压气机等。此外，还可利用汽轮机的排气或中间抽气满足生产和生活上的供热需要。这种既供热又供电的热-电联产汽轮机具有较高的经济性。因此，汽轮机在现代工业各部门中占有相当重要的地位。这里还要指出的是，电力生产是衡量一个国家经济发展水平的重要标志之一。电力工业为国民经济各个领域和部门提供电能，它的发展直接影响工农业建设的速度。我国电力工业到本世纪末要求年火力发电量为9000亿kW，火电装机容量为1.82亿kW。目前火力发电厂最主要的原动机是蒸汽轮机，因此对蒸汽轮机发电容量和效率

方面就有更高要求。在今后一段时期内,我国火电主力机组将是300~600MW的亚临界机组,同时还要大力发展超临界机组。

§1-2 燃气轮机和蒸汽轮机的发展简史

表1-1和表1-2为燃气轮机和蒸汽轮机初期发展重要事件的一览表。从1906年第一台

表 1-1 燃气轮机初期发展重要事件一览表

年份	国家	发明者	燃气轮机情况简介	燃气轮机特点
1906年	法国	拉马尔·阿尔芒哥	第一台压比为4,透平前温560°C,效率3%的燃气轮机	
1908年 1920年	德国	工程师霍尔·兹瓦斯	从1908年37kW,经不断发展至1920年功率达370kW,效率13%	等容燃烧燃气轮机
1939年	瑞士	爱休维斯公司	效率为31.5%的燃气轮机	第一台闭式燃气轮机
1939年	瑞士	BBC公司	压比为4.38,功率为4MW,效率为13%的燃气轮机	第一台发电用的简单循环燃气轮机
1939年	德国	海因凯尔公司	装有喷气发动机的飞机试飞成功	第一架涡轮喷气发动机
1941年	瑞士	BBC公司	功率为1641.2kW,效率16%的燃气轮机	第一台机车燃气轮机
1947年	英国	MV公司(现GEC公司)	装有燃气轮机的舰艇试航	第一台船用燃气轮机
1950年	英国	Rover公司	装有燃气轮机的汽车问世	第一辆汽车燃气轮机

表 1-2 蒸汽轮机初期发展重要事件一览表

年份	国家	发明者	蒸汽轮机类型	蒸汽轮机特点
1883年	瑞典	工程师 古斯塔·拉伐尔	轴流式单级冲动式汽轮机 (功率:3.7kW;转速:26000r/min)	采用了缩放喷管(拉伐尔喷管)和等强度叶轮
1884年	英国	工程师 查尔斯·巴森斯	轴流式多级反动式汽轮机 (功率:3.7kW;转速:17000r/min)	反动式 多级
1896年	英国	工程师 巴森斯	汽轮机装在透平尼亚号船上,航速达32knots	
1900年	美国	寇蒂斯	单级复速级汽轮机(又称寇蒂斯涡轮)	采用复速级
1900年 1903年	法国 瑞士	拉透 崔利	多级冲动式汽轮机	把冲动原理应用于多级
1912年	瑞典	容斯特罗姆	辐流式汽轮机	辐流
1920年			抽汽式给水预热蒸汽汽轮机	提高了循环效率
1923年 1924年	德国	西门子公司	22.05MPa,400°C 超临界中间再热式汽轮机	提高循环效率

效率为3%的燃气轮机问世,到1939年的第一代工业上实用的电站燃气轮机和涡轮喷气发动机的出现,为燃气轮机的发展奠定了坚实的基础。从本世纪40年代起,燃气轮机开始进入了工业的各个领域,并且得到了完善的发展。50多年来,燃气轮机主要沿着以下几方面发展;

1. 单位公斤空气流量发出的功率(又称比功)增加

比功表征了燃气轮机的重量尺寸,是燃气轮机的一个重要指标。比功的发展情况见图 1-1,从中可以看到,60年代初期,比功为 149.2kJ/kg,60年代后期,比功为193.9kJ/kg。到70年代,比功增加到 261.1kJ/kg。80年代后,比功增加更快,据报道,新一代机型的比功已达300~363kJ/kg。从60年代末期到80年代中期,比功增加了 26% 以上,这使进、排气道面积下降了 26% 以上,这是一个很重要的进步。

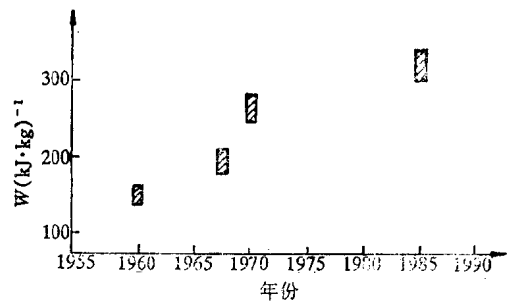


图 1-1 比功随年份的变化

2. 耗油率减少

耗油率表征着燃气轮机循环的经济性。图 1-2 中第一框图表明,50年代后期和60年代产品的耗油率为 355.4~484.57 g/(kW·h)。第二框图显示,60年代后半期产品的耗油率降为 333.8~284.3 g/(kW·h)。第三框图是70年代产品,耗油率为 259.6~234.8 g/(kW·h)。可见,近20年中耗油率改进了 50% 以上。据资料报道,80年代到90年代初的新一代燃气轮机,效率已达 38% 以上(耗油率约为 219.8g/(kW·h))。例如美国 GE 公司生产的 LM5000PDSFIG,其机组效率为 44.4%(耗油率约为 188.1g/(kW·h))。

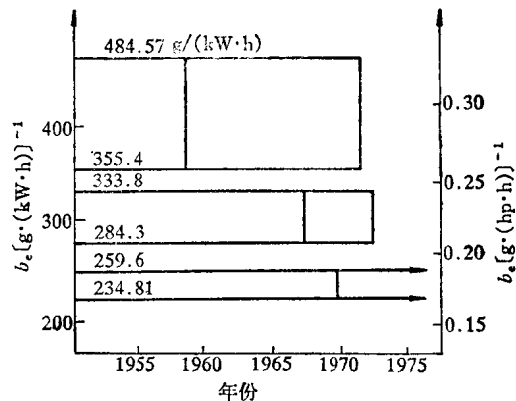


图 1-2 耗油率随年份的变化

3. 燃气初温不断提高

由于耐高温合金和冷却技术的不断发展,燃气初温的允许值也就不断提高。从图 1-3 可以看到,60年代初的产品,燃气初温仅为 1020~1090K,到70年代提高到 1380~1490K。80年代后,据报道新一代机型的燃气初温约为 1443~1513K,比70年代增高不多。这是由于目前金属的耐热极限约为 1373K 左右,温度的提高依赖于冷却技术的改进。近年来,国外正在研究各种冷却方式,包括气膜冷却、发散冷却、水和蒸汽等冷却方式,希望燃气温度能提高到 1873~2073K 左右。另一种是大力研制如 Si₃N₄ 和 SiC 等材料的叶片,其耐热度可达 1573~1973K,已在静叶上试用。

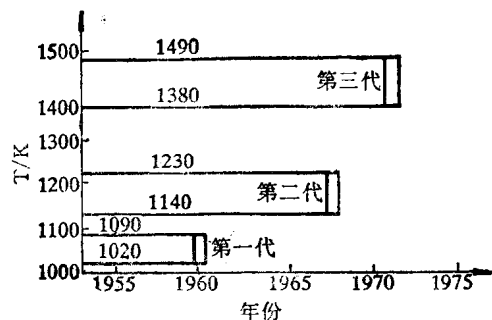


图 1-3 初温随年份的变化

近 20 年来,燃气轮机在许多领域内得到了迅猛的发展。然而在 70 年代后期,由于世界能

近 20 年来,燃气轮机在许多领域内得到了迅猛的发展。然而在 70 年代后期,由于世界能

源危机的出现,燃气轮机的发展受到一定的抑制,在国际市场上也呈现不景气的状态。

新的困难、新的形势可以成为促进燃气轮机技术更臻完善的动力。80年代初期出现了许多研究课题,这决不是偶然的。其中比较重大的列举如下:

(1) 热力学或气动力学领域 蒸汽—燃气联合循环的研究和制造,新型绝热复合式发动机的研制,燃气轮机总能量综合利用,回热循环燃气轮机的发展,冷却技术的改进,蒸汽回注技术的采用,跨声速压气机和透平的出现,等等。

(2) 材料科学领域 新型耐热合金的研制,高温结构陶瓷的发展以及各种纤维增强高温复合材料的涌现,特种陶瓷叶片的开发,定向结晶、粉末冶金、陶瓷冶金等新工艺的采用等。

(3) 燃烧学方面 高效、高热容量、低污染燃烧室的研制,劣质材料乃至固体燃料燃烧机理的发展和应用;重燃料和重油的处理,降低排气中 NO_x 的含量,等等。

现在世界上已有多个国家、100多家企业生产近千种型号的燃气轮机。已形成了以GE、PW、GEC-RR、ABB、KWU、WH 6家大厂为中心的6个最大的跨国生产集团,其中产量最大的三家是GE、PW、GEC-RR,其产品正向高温、高压比、轻型箱装式发展,比较先进。

蒸汽轮机从1883年第一台实用性机组问世至今,已有100多年历史,它的主要技术发展趋势有以下几个方面:

(1) 单机功率的迅速增长

图1-4显示了汽轮机单机功率的增长情况,其中横坐标是年份(1910~1980年),纵坐标是单机功率。由于大功率机组效率高、单位功率成本低以及电厂的单位造价小等原因,现代电厂都力求采用目前可能生产的最大容量的机组。图中左方两条虚线表示世界上电站汽轮机单机功率在这70年中基本的增长趋势;很明显,1945年以后单机功率的增长率比1945年以前加快很多。图中同一条横线上有时出现不止一个圆点,这反映了同一功率等级的机组有不同型式(单轴或双轴、常规的或核动力的)。图中右方的一些圆点和两条虚线表示我国汽轮机单机功率的增长情况,可供比较。

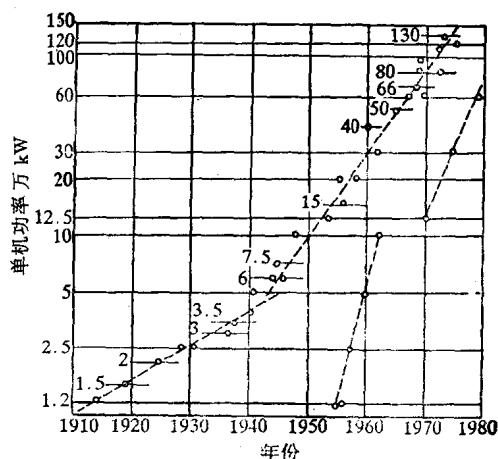


图 1-4 汽轮机单机功率的增长

(2) 蒸汽初始参数的提高

提高蒸汽参数可以改善机组的经济性。例如,超高参数电厂(蒸汽初压13MPa、初温565℃,中间再热温度565℃)的发电煤耗可达0.35kg/℃,而超临界参数(蒸汽初压24MPa,初温580℃,中间再热温度565℃)的发电煤耗可降低到0.315kg/℃。但蒸汽参数的提高是受一定条件限制的,由于目前倾向于少用奥氏体钢,多用珠光体钢,以提高机组的适应性,所以温度多稳定在560~570℃以下。至于压力,目前多采用亚临界(16~17 MPa)和超临界(24~25 MPa)两档。采用超临界压力,经济性可更高一些,但机组的适应性和可靠性略差一些。

(3) 采用联合循环系统提高效率

为了减少传热温差损失,提高循环上限温度,随着高温金属材料的开发和燃气轮机效率的提高,采用燃气—蒸汽联合循环,以提高机组的效率,已受到各国的重视。现在世界上已有约

2万 MW 机组以联合循环方式发电,它们的使用性得到了很高的评价,大大提高了机组热经济性。

(4) 降低金属消耗量和成本

机组的金属消耗量由早期的 4~8kg/kW,降低到现在的大功率汽轮机组的 2~3kg/kW。图 1-5 所示是几台典型机组的材料消耗率比较。由图可知,机组单位功率重量变化的基本趋势,是随单机组功率的提高而下降。这里还要指出的是,新工艺的采用对减少机组单位功率的重量起了很重要的作用。例如,汽轮机大型转子过去采用整锻结构,现改用焊接结构后,不仅可减小锻件尺寸,容易保证制造质量,而且可以制成薄壁鼓形,节省了材料和减少了热应力。汽轮机组的制造成本也随材料消耗量和加工量的减少而降低。

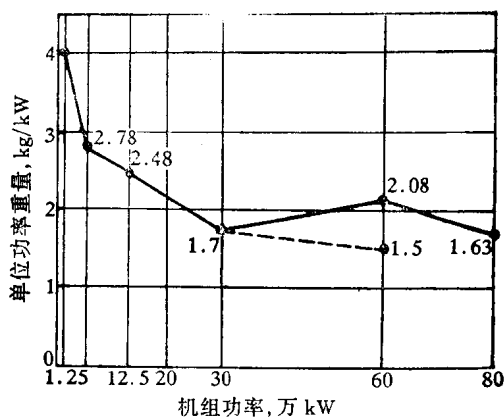


图 1-5 机组材料消耗率比较

(5) 提高机组的运行水平

机组的容量增大,参数提高,必然使其零部件增多,尺寸增大,热应力变化增大,因此也相应地增加了事故因素,使其安全可靠降低。为了提高机组的运行、维护和检修水平,一般在保安报警和监测系统中采用了越来越先进的电子装备,如微机监控、计算机故障诊断等。为了提高机组运行的经济性,还采用了各种最优运行方式,如推广在低负荷范围内的变压运行和滑参数启停等运行方式,取得了良好的效果。

汽轮机制造能力往往标志着一个国家的科学技术和工业水平,所以世界上各发达或发展中国家内,汽轮机制造工业发展都比较快。美国主要集中在 GE 和 WH 公司,苏联主要集中在列宁格勒金属工厂(JIM3)和哈尔科夫汽轮机厂(XTГ3)。其他如日本的日立、东芝、三菱等都是综合性机械制造企业,瑞士的 ABB 公司也是目前生产汽轮机的大型公司之一,它们都已取得了许多重要成就。

§1-3 燃气轮机和蒸汽轮机的总体结构

本节将通过若干机组的介绍,了解燃气轮机机组和蒸汽轮机总体结构的一般情况。

1. 燃气轮机

图 1-6 是船用斯贝燃气轮机的燃气发生器部分。斯贝 RB244 船用燃气发生器是由斯贝 RB168—62 航空涡扇发动机改型而成的。由图 1-6 可见,它具有 5 级低压轴流式压气机、11 级高压轴流式压气机,压气机分别由各自的两级涡轮驱动,燃烧室有 10 个火焰筒。燃气发生器的轴承均采用滚动轴承,并有油膜减振。压气机机匣上的附件齿轮箱用以传动滑油泵、换气泵、水泵、输出转速信号并和起动机构相联。压气机机匣和燃烧室外壳都有水平中分面,以便于检修。机匣上并设有孔探仪安装孔。

为了适应舰用要求,船用斯贝的动力涡轮设计寿命为 30 年,即与船龄相同。图 1-7 显示

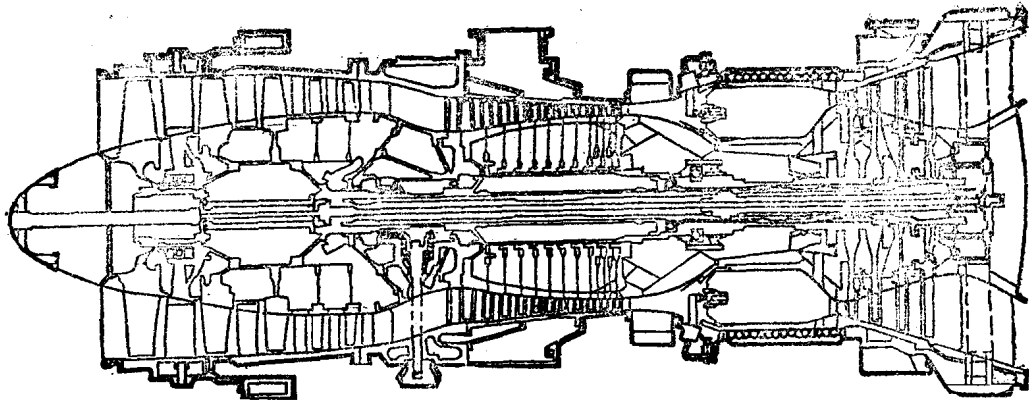


图 1-6 RB244船用燃气发生器

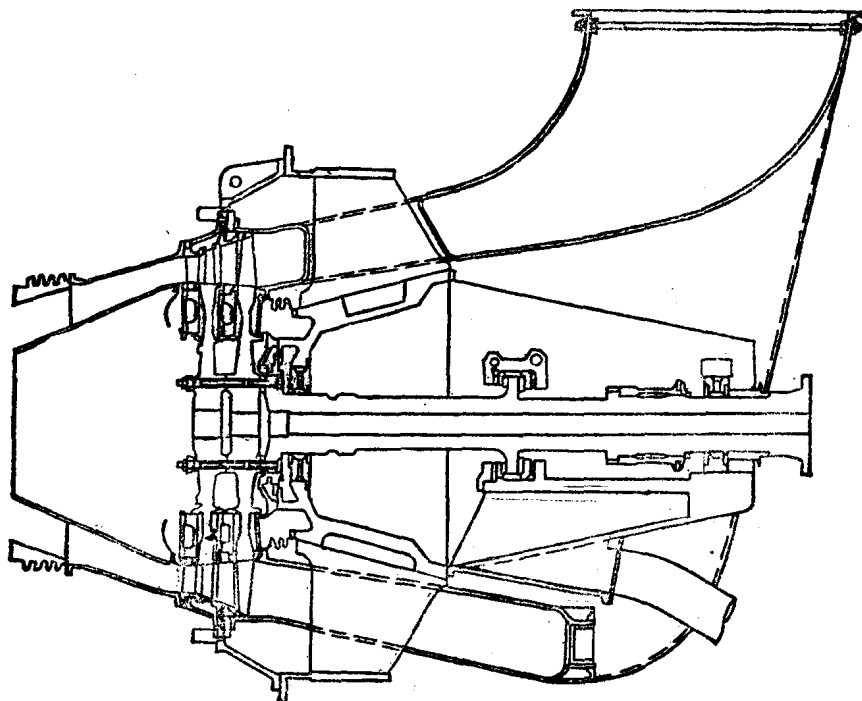


图 1-7 SM1A与SM2A的动力涡轮

动力涡轮的结构。动力涡轮的转子是悬臂式，支持在巴氏合金滑动轴承上。轴承安装在钢制的支承环中，轴承四周是排气蜗壳。动力涡轮通过扩压器与波纹管与燃气发生器作挠性连接。在舰艇使用期限内，动力涡轮不需拆下翻修。该涡轮的设计转速为 4730r/min，效率为 86.6%。

船用斯贝机的外形尺寸见图 1-8，斯贝 SM1A 型燃气轮机总重 19299kg，发生器部分重 1400kg。

箱装体的结构见图 1-9，它包括有安装在钢底座上的燃气发生器和动力涡轮，带有导流叶栅的进气系统、辅助设备、动力电流接头和灭火系统。箱体上有燃油、水、空气、电气、控制和滑油系统的标准接头。箱装体具有隔热、隔音、单独通风、抗冲击、抗原子、抗生物和抗化学污染的能力。

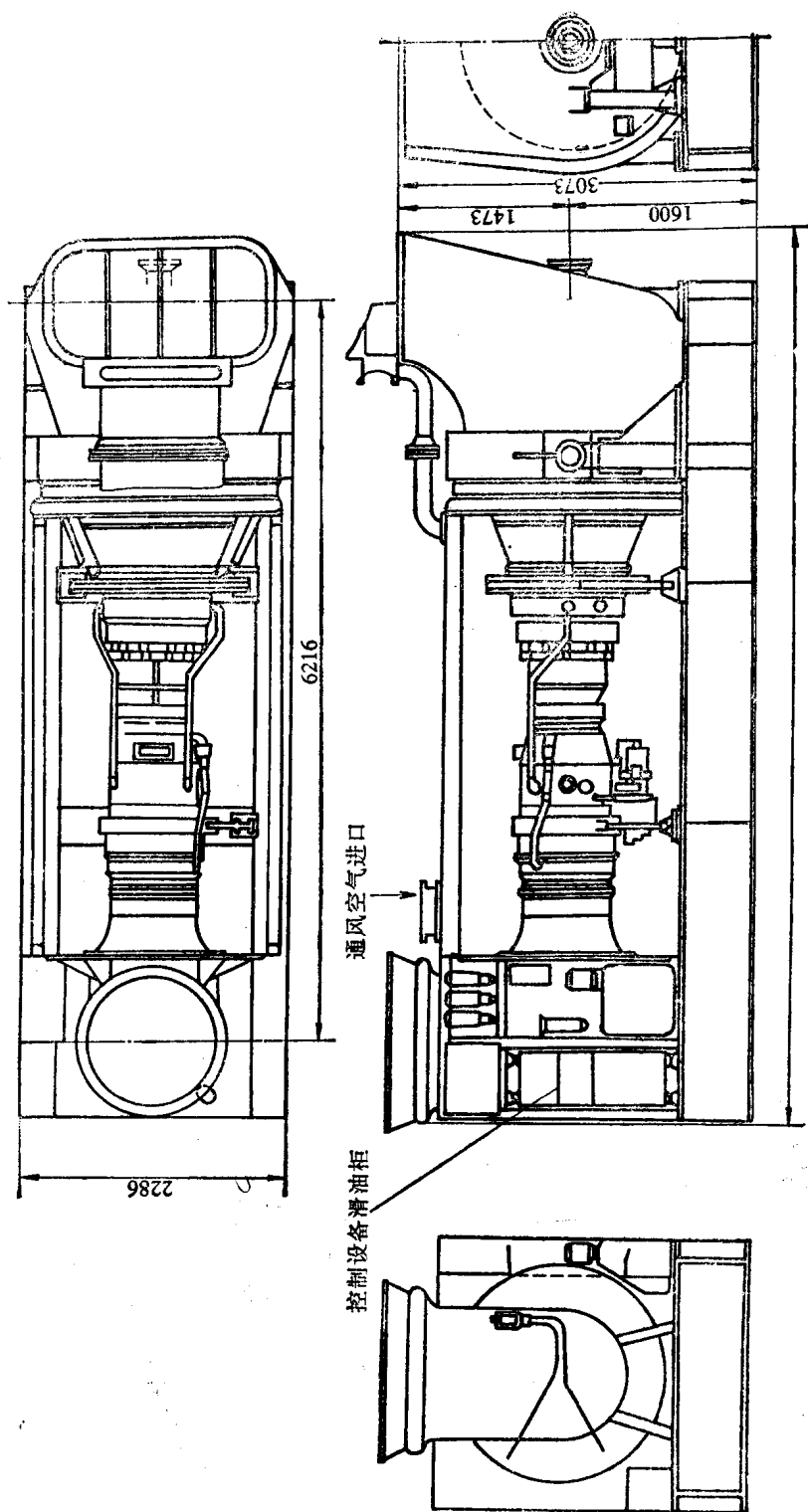


图 1-8 SM1A 燃气轮机的总布置

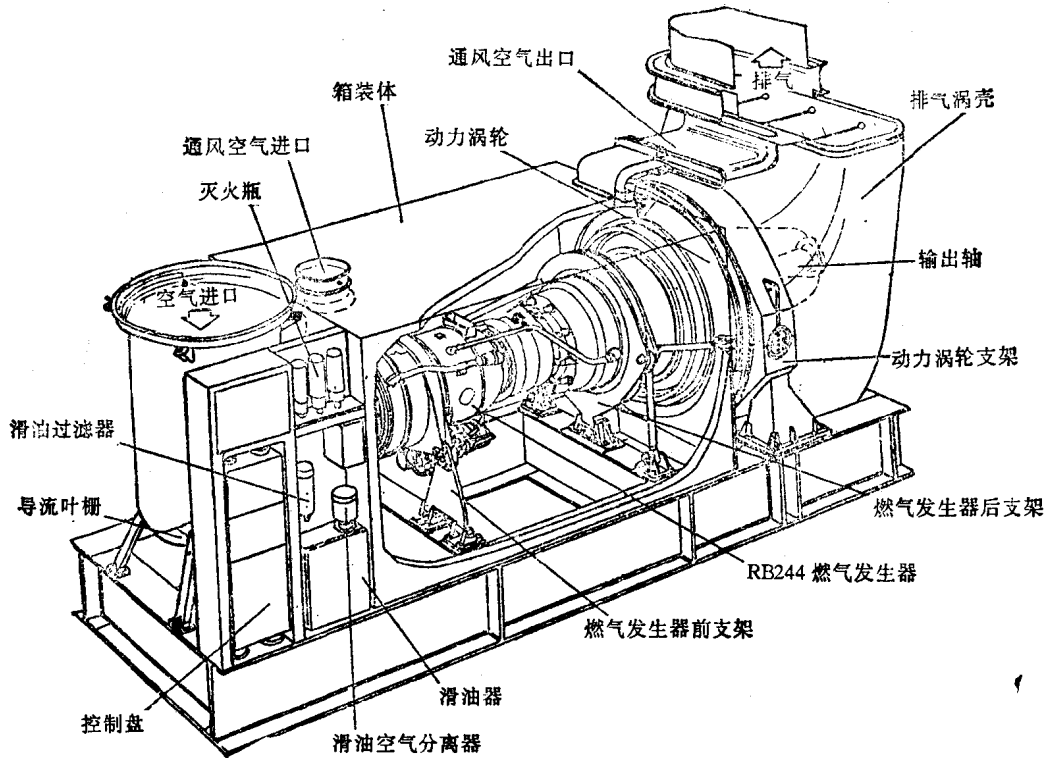


图 1-9 SM1A 船用燃气轮机箱装体

图 1-10 为 LM5000 舰用燃气轮机的燃气发生器及其航空发动机母型 (CF6-50) 的剖视

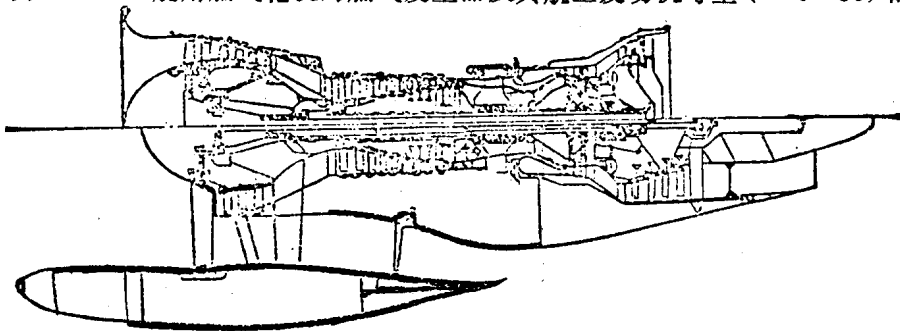


图 1-10 LM5000 舰用燃气轮机及其航空发动机母型

图 1-10 LM5000 舰用燃气轮机及其航空发动机母型

图。LM2500 和 LM5000 都是美国通用电气公司的船用机组，它们都是从 CF6 航空系列改型而得。由图可见，LM5000 燃气轮机为双转子结构，由 5 级低压压气机、14 级高压压气机、2 级高压涡轮、1 级低压涡轮、环形燃烧室以及 3 级动力涡轮(图中未示出)所组成。机组总压比为 30，燃气初温高达 1533K，等熵功率达 44011.1kW(59000hP)。LM5000 机组本身的外形尺寸为 8.331×3.023×2.642(m)。

为了对船用机组箱装体的结构有进一步了解，图 1-11 中示出了 LM2500 机组及其箱装体。图中可看清发动机在箱体內的支撑。

船用燃气轮机的进、排气道的尺寸很大。图 1-12 为 LM2500 发动机的进、排气道简图，由图可见，它们所占空间与箱装体体积之间的比例。在进、排气道中都有消音器，进气道还用

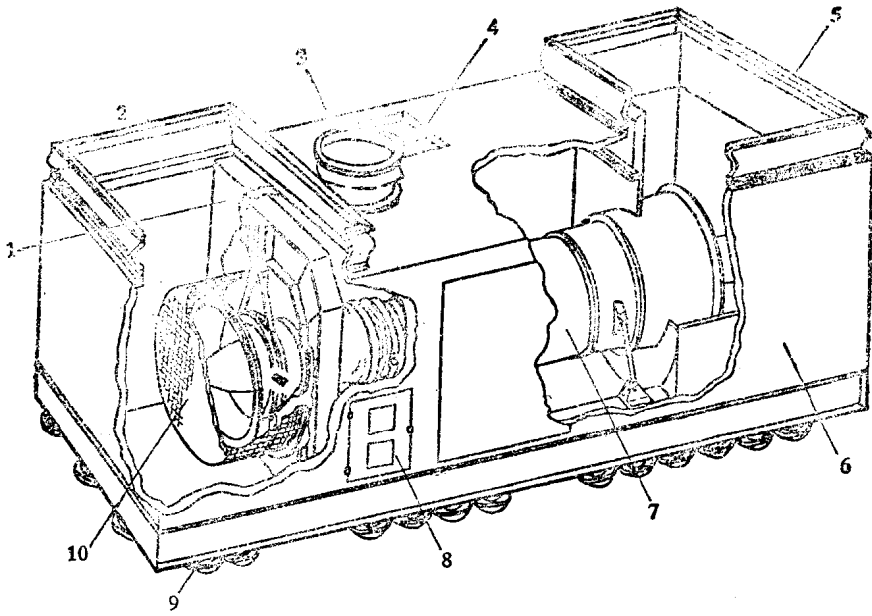


图 1-11 LM2500燃气轮机推进装置立体图

- 1—进气室端壁 2、5—箱体的弹性接口 3—箱体冷却空气入口 4、6—检修用入口
6—箱体外壁 7—发动机 9—底座下的减振器 10—发动机进口滤网

作发动机卸装后吊出机舱的通道。进气道侧的支管用于给箱装体输送冷却空气，而冷却空气的引出则是依靠发动机排出废气的引射作用。

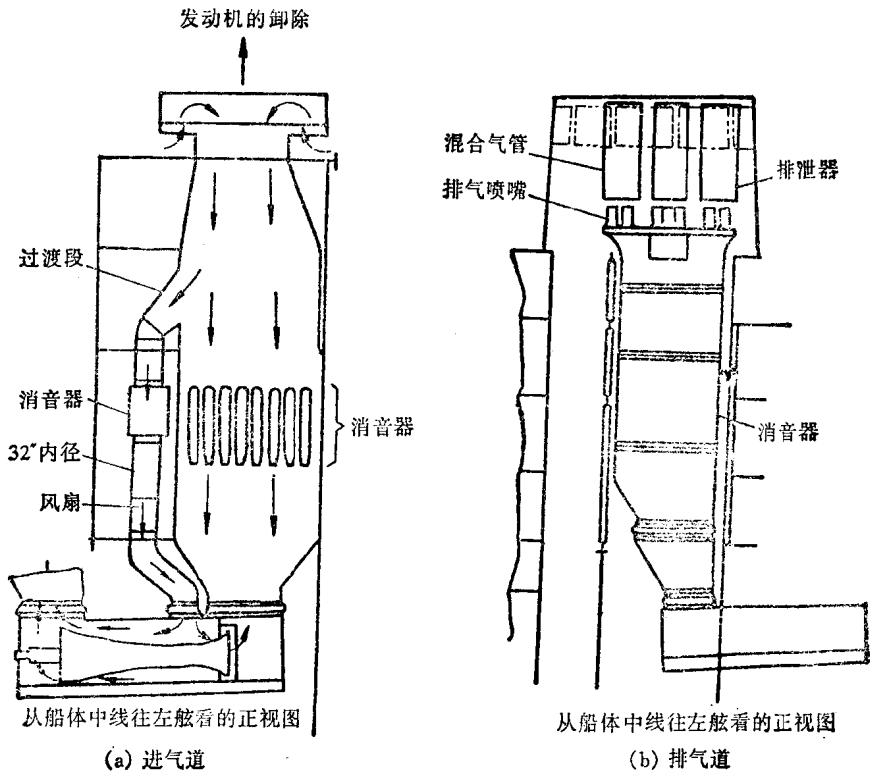


图 1-12 LM2500及进、排气道

2. 蒸汽轮机

图 1-13 示出了我国哈尔滨汽轮机厂自行设计生产的 20 万 kW 汽轮机的纵剖面图,它是一次中间再热、凝汽式、单轴、三缸、三排汽口的汽轮机。进入该机组高压缸的新蒸汽参数为 12.75MPa、535℃,经再热后进入中压缸的再热蒸汽温度为 535℃。该汽轮机的通流部分由高、中、低压三部分组成,共有 37 级。高压部分有 1 个单列调节级和 11 个压力级;中压部分为 10 个压力级;低压部分为三分流式,每一分流有 5 个压力级,其中一个分流布置在中压缸后部,另外两个分流对置在低压缸中。该汽轮机全长 21m,宽 10.8m,高(至运行层平台)4.7m,总长 36.3m。机组的外貌见图 1-14。汽轮机采用喷嘴调节。进入高压缸的新蒸汽由 2 个高压自动主汽阀和 4 个高压调节汽阀控制。高压缸排汽进入中间再热器,蒸汽再热后经过 2 个中压主汽阀和 4 个中压调节阀进入中压汽缸。中压汽缸排汽分三路进入低压部分,其中 1/3 流量进入中压后汽缸,其余 2/3 经连通管进入低压汽缸,再分别排入 3 台凝汽器。汽轮机负荷变化主要依靠高压调节汽阀进行调节。在低于额定负荷 35% 时,中压调节汽阀才参与调节,该阀在其他工况时保持全开状态。发生事故时,主汽阀和调节汽阀能快速关闭,以防止在紧急情况下造成汽轮机超速事故。

该机组的高压缸为双层缸结构,而中、低压缸为单层 PT 板套式结构,其与凝汽器的连接部份为刚性焊接结构。为满足调峰机组快速启动的需要,高、中压汽缸都设有法兰、螺栓加热装置,且采用较大又较合理的通流间隙。

汽轮机汽缸的横向定位依靠与基架和轴承相配的垂直键来保证。纵向热膨胀有两个死点,分别在第一、第二排汽口后壁以横向键定位。前轴承箱、中轴承箱和中压汽缸依靠基架的纵向平键向前(机头)膨胀,死点后的低压缸向发电机方向膨胀。

高压转子为整锻式;中压转子为整锻加套装结构;低压转子全部套装结构。高、中压两转子采用刚性联轴器连接,由 3 个轴承支承,称作三支点。低压转子与发电机转子采用半挠性联轴器连接,由两个轴承支承。这样转子由 5 个主轴承支撑,均系三油楔式。推力轴承设置在高、中压缸之间的中轴承箱内,它为摆动瓦块结构。调节系统有纯机械液压调节和电液结合调节两种,它们可以通过电液切换阀切换,控制机组的运行。

图 1-15 是苏联 J1M3 生产的 120 万 kW 的汽轮机。该机的蒸汽初参数为 23.5MPa 和 540℃,并在 3.9MPa 的压力下中间再热到 540℃。

该汽轮机采用单轴布置,有 5 个汽缸,它们由高、中压缸和 3 个低压缸组成。机组采用节流调节法,并在蒸汽初压滑动时略有改变其负荷的可能性。蒸汽经过 4 个主汽门及 8 个调节汽门(每个主汽门壳体上焊接着两个调节阀门)进入高压缸中间部分,然后依次流过两个蒸汽流动方向相反的级段。布置在高压内缸中的第一段级组由 4 个级组成,第一段级组的隔板安装在高压内缸上,第一段级组排出的蒸汽在内外缸形成的环形空间绕流到第二段级组。第二段级组中 4 个级的隔板都固定在隔板套中,隔板套再安装在高压外缸上。经过中间再热后的蒸汽分别由两个主汽门和调节汽门组成的联合汽门进入双分流式中压缸的中间部位。在中压缸的每一股分流蒸汽中各布置 8 个级,前 3 级布置在中压缸内缸中,后面 5 个级则装在隔板套后,再装在中压缸外缸中。低压缸也采用双层结构,其末级动叶片长达 1200mm,排气口总面积达 66m²。高压转子为整锻转子,动叶片采用叉形叶根,并在叶身上整体铣制出围带折边。每 4~5 个叶片沿围带焊接成叶片组。中压缸转子也是整锻而成,动叶片的制作和高压缸相

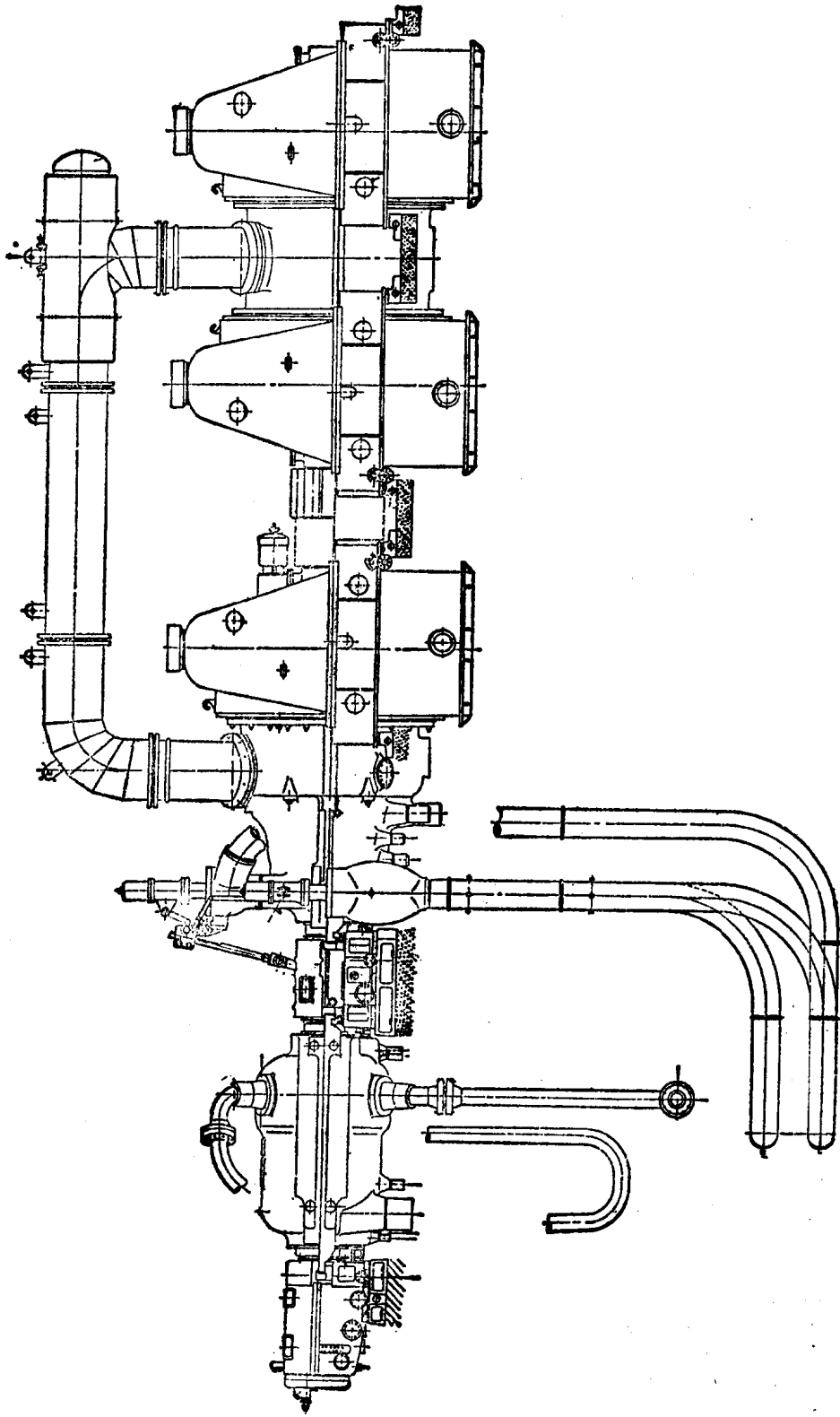


图1-14 机组外貌(1)

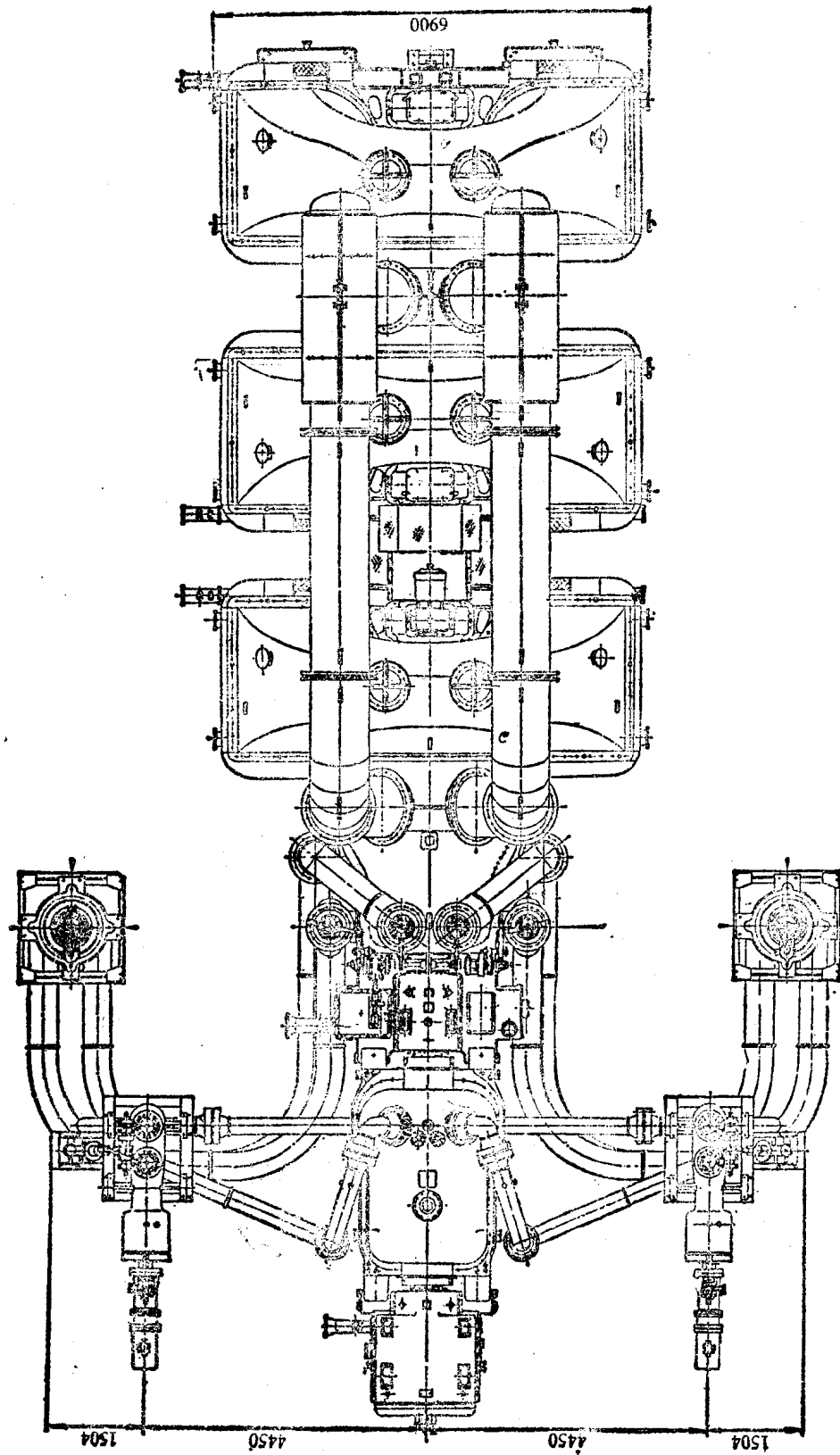


图 1-14 机组外貌(2)