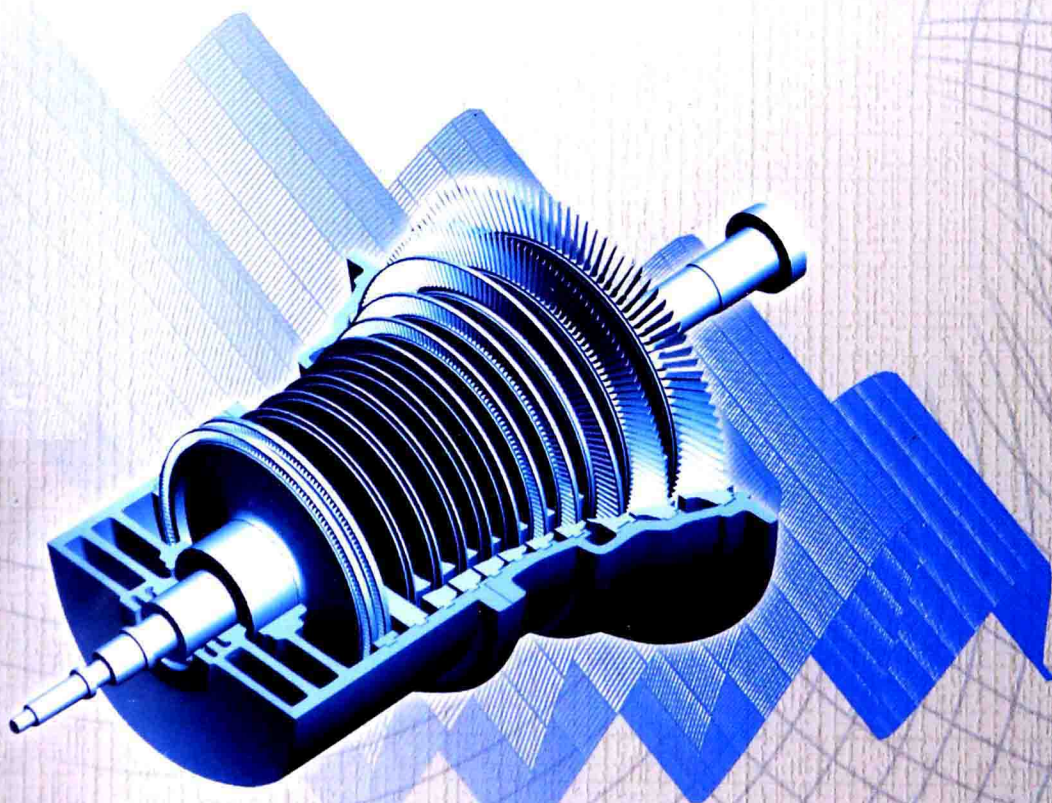




普通高等教育“十二五”规划教材

汽轮机原理

王新军 李亮 宋立明 李军



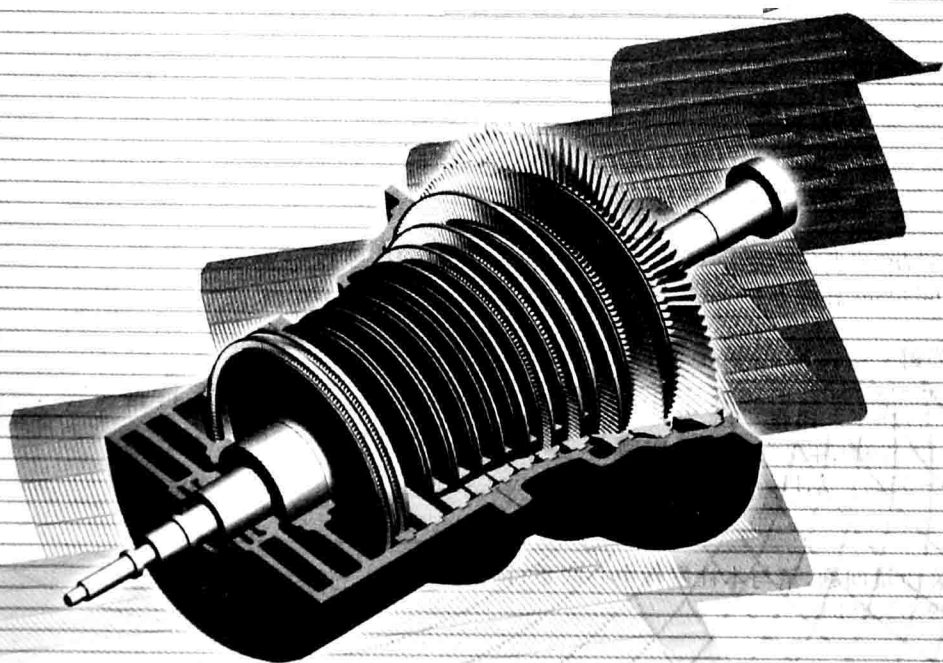
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

汽轮机原理

王新军 李亮 宋立明 李军



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以发电汽轮机为主要对象,系统、深入地阐述了汽轮机的工作过程与工作原理、热力设计方法及变工况特性,同时也兼顾了燃气轮机的基本工作原理。全书分为6章:第1章简述了汽轮机的发展历史、特点、类型及基本结构;第2章系统介绍了汽轮机级的工作原理与设计计算方法,并介绍了叶栅气流特性和试验数据的应用方法;第3章主要介绍了单级汽轮机的结构、各项损失与对应的效率和功率,并介绍了汽轮机的汽封装置;第4章介绍了汽轮机级的二维和三维流动模型及设计计算方法;在第2~4章的基础上,第5章介绍多级汽轮机的工作过程、存在的特殊问题以及解决方法;第6章介绍汽轮机的变工况特性及变工况计算过程。各章之后均附有习题。

本书可作为高等学校本科能源与动力工程学科相关专业的教材,也可供从事汽轮机制造与运行管理的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机原理/王新军等编著. —西安:西安交通大学出版社,2013.12
ISBN 978-7-5605-5524-9

I. ①汽… II. ①王… III. ①蒸汽透平-高等学校-教材 IV. ①TK26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 186253 号

书 名	汽轮机原理
编 著	王新军 李 亮 宋立明 李 军
责任编辑	任振国 季苏平

出版发行	西安交通大学出版社
	(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtpress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心)
	(029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82668280
印 刷	陕西丰源印务有限公司

开 本	787mm×1 092mm	1/16	印 张	16.75	字 数	409 千字
版次印次	2014 年 2 月第 1 版		2014 年 2 月第 1 次印刷			
书 号	ISBN 978-7-5605-5524-9/TK·109					
定 价	30.00 元					

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

前 言

为了贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,西安交通大学叶轮机械研究所几位教师根据多年汽轮机原理及相关课程的教学实践和体会,在《蒸汽轮机》一书的基础上进行了编写。

《蒸汽轮机》一书是西安交通大学原涡轮机教研室的蔡颐年教授主编,多位教师参编,并由西安交通大学出版社于1988年3月正式出版发行的教材。该书比较全面且深入系统地介绍了汽轮机的工作原理、热力设计、装置和应用等各方面问题。二十多年来,西安交大涡轮机专业一直将《蒸汽轮机》作为本科教材,为国家培养了大批既能从事热力涡轮机及动力设备的设计、生产、科研、教学等工作,也能从事电厂热能工程、流体机械与流体工程、航天航空工程、交通运输、化工、冶金等相近工程领域工作的高级工程技术和研究人才。同时,《蒸汽轮机》一书也深受相关行业技术人员的推崇,是许多汽轮机企业的内部培训教材。

近二十年,科学技术的进步促进了汽轮机的快速发展,出现了超临界、超超临界的火电汽轮机,1400MW的大功率核电汽轮机以及各种参数、各种形式的节能减排汽轮机,各种先进的汽轮机设计理念也广泛应用在汽轮机的设计中。另外,随着国家高等教育理念的变化,宽口径通才培养模式也已成为目前各高校本科教学的发展趋势。

在此大环境下,原有《蒸汽轮机》一书的内容就略显不足。为了适应新形势下的本科教学,我们在《蒸汽轮机》的基础上,遵循原书内容的总格局,删除一些过于深奥和过时的内容,补充了一些最新的研究方法与成果以及其它的内容,使本书内容更加易于理解和实用,也在一定程度上反映了汽轮机气动热力设计技术的发展现状。

全书共分6章,主要内容包括:汽轮机的类型与基本结构,汽轮机级的工作原理与热力设计,单级汽轮机的结构与工作过程,汽轮机级的二维和三维设计计算方法,多级汽轮机,汽轮机变工况特性。

参加本书编写的有西安交通大学能源与动力工程学院王新军(第1章和第2章),李亮(第5章和第4章部分内容),李军(第3章)和宋立明(第4章部分内容和第6章)。本书由王新军担任主编,李亮、宋立明和李军担任副主编。

在本书的编写过程中,得到了很多有关院校和行业单位的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

西安交通大学俞茂铮教授和东方电气集团东方汽轮机有限公司的赵世全教授级高工对本教材进行了评阅,两位的宝贵意见对提高本书质量起了极大的作用,编者深表谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013年5月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 汽轮机的发展历史及现状	(1)
1.2 汽轮机的特点与用途	(3)
1.3 汽轮机的分类与标准	(7)
1.4 热力循环和汽轮机的基本结构	(9)
第 2 章 汽轮机级的工作原理	(13)
2.1 概论	(13)
2.2 叶栅通道中的流动过程与通流能力	(16)
2.3 级的速度三角形	(38)
2.4 级的轮周功率与轮周效率	(41)
2.5 轮周效率与速比的关系	(46)
2.6 径流式级的能量转换	(53)
2.7 叶栅气流特性	(58)
2.8 叶栅试验数据的应用	(73)
2.9 计算例题	(79)
2.10 习题	(80)
第 3 章 单级汽轮机	(82)
3.1 单级汽轮机概述	(83)
3.2 双列复速级的通流部分和轮周效率	(86)
3.3 摩擦损失、鼓风损失和弧端损失	(90)
3.4 级的相对内效率	(93)
3.5 双列复速级蒸汽轮机的热力计算	(97)
3.6 汽封装置	(100)
第 4 章 汽轮机级的二维和三维设计	(113)
4.1 级内的空间气流	(115)
4.2 等环流流型透平级	(121)
4.3 等 α_1 角流型和等密流流型	(127)
4.4 用完全径向平衡方程计算的透平级	(132)
4.5 其它流型	(140)
4.6 汽轮机级的三维设计优化	(142)
4.7 习题	(147)
第 5 章 多级汽轮机	(148)
5.1 多级汽轮机的工作过程与特点	(148)

5.2	内效率与重热系数	(153)
5.3	余速利用	(162)
5.4	级的漏汽损失	(167)
5.5	湿蒸汽级的能量转换	(172)
5.6	轴向推力及其平衡	(184)
5.7	热力设计原理	(188)
5.8	习题	(217)
 第 6 章 汽轮机变工况特性		(219)
6.1	喷管变工况	(220)
6.2	级与级组的变工况	(227)
6.3	级组变工况的详细计算	(235)
6.4	汽轮机变工况	(240)
6.5	变转速汽轮机的变工况	(253)
6.6	习题	(257)
 参考文献		(259)

第 1 章 绪 论

汽轮机是透平机械的一种。透平一词来源于英文 Turbine 的音译,其含义是一种旋转式的流体动力机械。用于使气体热能与机械功发生相互转化的透平称为热力透平或热力涡轮机。透平包括汽轮机(也称为蒸汽轮机或蒸汽透平)、燃气轮机(也称为燃气透平)、透平压缩机等。汽轮机即是以蒸汽为工质并将蒸汽的热能转化为机械功的热力透平。

1.1 汽轮机的发展历史及现状

汽轮机的发展至今已有 130 年历史。作为原始的雏形,可以追溯到古代我国具有悠久历史的走马灯、风车、水车、水磨、火轮等。图 1-1 是走马灯的结构示意图,它是很原始的冲动式轮机雏形,走马灯中的灯火加热气流,热气流上升冲击叶轮旋转并带动灯筒一起转动。风车等则是利用自然界中存在的流动工质,冲击叶轮旋转做功并带动其它装置工作的冲动式轮机原型。

另外,公元前 150 年古埃及设计制造出的希罗球(见图 1-2)和中国烟火中的火轮,则是工质不同的反动式轮机的原始形式。古希腊科学家和发明家亚历山大在他所著《气体装置论》一书中,详细描述了希罗球的工作过程。希罗球是支撑在两根垂直导管上的空心球体,当用火加热下面容器内的水时,蒸发出来的蒸汽沿两根导管分别进入球内,从球上的两根相反方向的弯管喷出,由于喷汽的反作用力,球沿着与喷汽流动相反的方向旋转,这是历史上最早记载的喷汽动力装置。火轮则是利用火药燃烧产生的气体沿轮盘的切向喷出,其反作用力推动轮盘高速旋转。由于当时的经济条件和技术条件所限制,这几种汽轮机原型都没有进一步发展成工业上的发动机,只是成为有趣的玩具。

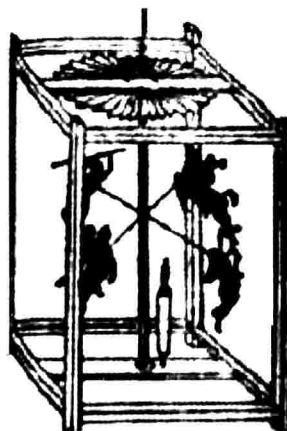


图 1-1 走马灯结构示意图



图 1-2 希罗球示意图

在西方工业革命之后,出现了许多大的工厂和作坊,客观上迫切需要强大的动力源,而工业技术的发展也为新型发动机的制造提供了技术条件。

1883年,瑞典工程师古斯塔夫-拉伐尔设计制造了第一台轴向单级冲动式汽轮机,转速高达 25 000 r/min,功率却仅有 3.8 kW。这台汽轮机是制造现代汽轮机的开始,在以后的发展中得以不断改进、提高并完善。

1884年,英国工程师查尔斯-柏森斯,设计制造了第一台多级反动式汽轮机,转速为 17 000 r/min,功率达到 7.5 kW。

1896年,美国工程师寇蒂斯制造了速度级的汽轮机。

1902年,法国拉托教授设计制造了多级冲动式汽轮机。

这些以不同能量转换方式制造的各种形式的原型汽轮机,奠定了汽轮机发展的基础,使汽轮机在工作原理、结构、制造工艺等方面得以迅速发展,生产出从 500 kW、2 000 kW 到 50 000 kW 的汽轮机。20 世纪 40 年代以后,汽轮机的发展更加迅猛,单机功率从 50 MW 增大到目前的 1 000 MW,而核电汽轮机的单机功率更是高达 1 500 MW。

在功率增大的同时,汽轮机的进汽参数也发生了相应的变化,从最初的新蒸汽压力约 1.1 MPa 增大到目前的超临界压力,甚至是超超临界压力(蒸汽的临界压力为 22.115 MPa,温度为 374.12 °C)。蒸汽的温度也从早期的 300 °C 增大到目前最高的 610 °C。

中国的汽轮机制造业起步于 20 世纪 50 年代,相对于发达国家来说起步较晚。最初的技术来源于前苏联和东欧捷克。1956 年,上海汽轮机厂生产制造了我国第一台 6 000 kW 的汽轮机,安装在淮南电厂。之后,中国汽轮机制造业的发展类似世界汽轮机的发展,单机功率从 6 000 kW 一直发展到 1 000 MW。目前正在研发的核电汽轮机单机功率为 1 400 MW。

总体来看,我国汽轮机的发展经历了四个阶段:第一阶段是 1953—1980 年,技术特征是仿制前苏联技术与低水平自主开发相结合,生产出 50 MW、75 MW、100 MW、135 MW、200 MW 的汽轮机。第二阶段是 1981—1990 年,期间引进了美国 Westinghouse 公司的技术,我国三大汽轮机制造厂(东方汽轮机有限公司、哈尔滨汽轮机厂有限公司、上海汽轮机有限公司)均参与了技术引进,生产出 300 MW 的汽轮机。第三阶段是 1991—2000 年,该阶段的特征是引进消化与自主创新相结合,表明我国的汽轮机技术已发展到较为先进的水平,重要产品是火电 600 MW 汽轮机和核电 1 000 MW 汽轮机,蒸汽参数从超高压向超临界压力发展。第四阶段是 2001 年以后,期间我国的电力市场需求高涨,汽轮机制造业得到迅速发展,三大制造厂的超临界 600 MW 汽轮机在引进技术基础上已形成批量制造能力,1 000 MW 超超临界汽轮机也已投入运行。

随着现代技术的不断进步,汽轮机在设计、材料以及制造工艺等方面仍在继续发展。目前,火力发电汽轮机的发展趋势有以下几个方面:

(1)高参数。新蒸汽压力高达 31 MPa,温度达 600 °C,再热蒸汽温度为 610 °C。

(2)大容量。单机最大功率已达 1 500 MW。

(3)高经济性。不断发展先进的通流部分设计技术,并采用先进热力循环与节能技术,以减小各种损失,提高效率。目前最高的循环热效率达 48%,一般亚临界机组效率为 43%。

(4)高安全可靠。例如,要求轴系双振幅的相对振动小于 50 μm 等。

汽轮机的设计与制造既涉及基础研究领域(材料技术、计算机技术等),又涉及到大量的技术装备,因此,汽轮机设计制造水平的高低直接反映一个国家的工业水平。目前,世界上能独

立研制汽轮机的国家为数不多。主要国家和著名厂商有美国的通用电气公司 GE, 法国的 ALSTOM 公司, 德国的西门子公司, 俄罗斯的列宁格勒金属制造厂, 瑞士的 ABB 公司, 日本的山崎、三菱等公司。中国的汽轮机生产厂商较多, 东方汽轮机有限公司、上海汽轮机有限公司和哈尔滨汽轮机厂有限公司是我国汽轮机的三大主力生产厂。另外, 还有一些中型汽轮机生产厂家, 如杭州汽轮机股份有限公司、北京北重汽轮电机有限责任公司、青岛捷能汽轮机集团股份有限公司、南京汽轮电机有限责任公司、广州斯科达一劲马汽轮机有限公司、洛阳中重发电设备有限责任公司、武汉汽轮发电机厂等。近十年来, 许多民营的汽轮机企业也在不断地发展和壮大。

1.2 汽轮机的特点与用途

1.2.1 汽轮机的特点

汽轮机出现后得到了迅速发展, 并不断地趋于完善, 很快就取代了以蒸汽为工质的往复式机械——蒸汽机。目前, 汽轮机作为最主要的热力原动机, 在能源、电力与动力工程等国民经济各领域以及国防方面都占有极其重要的地位。汽轮机是科技含量极高的重型精密旋转机械, 具有以下特点:

(1) 高压高温。汽轮机的进汽压力很高, 超超临界汽轮机的最大蒸汽压力为 31 MPa, 蒸汽温度约为 600 °C, 这将涉及到材料性能和冶金能力以及设计制造等方面问题。

(2) 高转速。我国火电汽轮机的转速为 3 000 r/min, 核电半转速汽轮机的转速为 1 500 r/min, 而驱动用汽轮机的转速则可能更高。高转速下的汽轮机动叶片的旋转速度很高, 尤其是大功率汽轮机的末级动叶片, 旋转产生的离心力大, 因此对材料的要求也很高。

(3) 高精度。作为高速旋转的动力机械和封闭系统, 汽轮机的转动部分和静止部分之间的配合要求以及转子动平衡要求很高, 转子加工精度要求端面 and 径向跳动小于 0.01 mm。转动部分和静止部分的间隙为 0.4~0.6 mm。高精度特点涉及到企业的机床加工能力和先进的工艺技术等方面问题。

(4) 涉及学科广。汽轮机的设计与生产需要多学科技术人员的共同努力才能完成。流体力学、热力学、传热学、计算数学、空气动力学、固体力学、弹性力学、断裂力学、金属材料、机械振动等十多门学科支撑着汽轮机的发展。

(5) 重型。大功率汽轮机的体积与重量庞大, 如火电 600 MW 汽轮机的本体重量达 1 000 t 以上, 长 28 m, 宽 10 m, 高 8 m。

(6) 对加工装备要求高。汽轮机零部件的冷加工需要数控 (CNC) 转子卧式车床、CNC 五坐标叶片加工中心、CNC 龙门铣床和镗床等, 热加工需要采用 30~100 t 钢包精炼炉浇注汽缸等静止部件, 万吨级压力机锻造主轴毛坯、大型热处理炉 (5 m×5 m×17 m) 以及先进的焊接设备、焊接隔板和汽缸等部件。

1.2.2 汽轮机的用途

汽轮机广泛应用于能源动力工业上, 目的是为了驱动发电机供给大量的电能或驱动其它动力机械, 以满足日益发展的工农业生产需要。因此, 汽轮机的用途有发电/热电联供和驱

动两种。

电力是现代化生产的主要动力,也是提高人们物质文化生活的重要条件,电力耗费已成为衡量一个国家技术和经济发展水平高低的重要标志之一。电力工业是将能源资源转化为电力的行业,它的发展标志着一个国家的发达程度。目前,电力的生产方式主要有以下几种。

(1)火力发电。火力发电采用煤、石油、天然气等化石燃料作为一次能源,通过化石燃料的燃烧将锅炉里的水加热成高压、高温的水蒸气,蒸汽进入汽轮机中膨胀做功,将蒸汽热能转化为机械能并带动发电机工作,最终将机械能转化为电能,如图 1-3 所示。在热电厂,汽轮机不但带动发电机对外供电,还利用汽轮机的抽汽或排汽对外供热,用于满足其它的工业生产需求或民用需求。这种火力发电形式非常普遍,火电厂的分布也很广。

(2)水力发电。水能是一种可再生清洁能源。水力发电的基本原理是利用水轮机将水的位能转化为机械能并带动发电机产生电能。我国著名的水电站有三峡、葛洲坝、小浪底等水电站,图 1-4 是三峡水电站的照片。

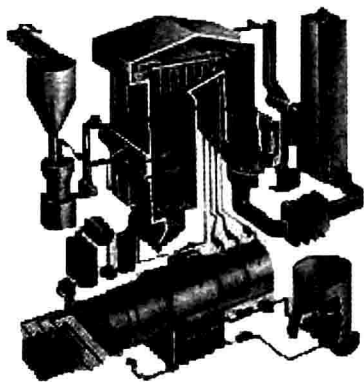


图 1-3 火电厂示意图

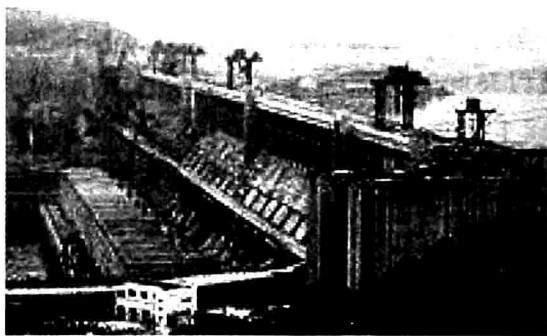


图 1-4 三峡水电站

(3)核能发电。核电是构成世界能源的三大支柱之一,在能源结构中占有重要地位。核能发电的原理与普通火电厂差别不大,只是产生蒸汽的方式不同。它是利用核燃料裂变释放的能量加热蒸发器中的水,从而产生蒸汽,蒸汽再进入汽轮机中膨胀做功,将热能转化为机械能并带动发电机工作产生电能,图 1-5 为核电厂工作原理图。发展核电是我国电力发展的中长期发展目标,国内已经建成或在建的核电厂有十几个,著名的有大亚湾核电厂、秦山核电厂和连云港核电厂等。

(4)风力发电。风能是一种无污染的可再生自然能源,随着人类对生态环境的要求和能源的需要,风能的开发日益受到重视。风力发电的原理是利用风力推动风力机的叶片旋转,再通过增速装置将旋转的速度提升来带动发电机发电,图 1-6 是风力发电示意图。我国的风能资源丰富,储量为 32 亿 kW,可开发的装机容量约为 2.5 亿 kW,居世界首位。目前,在新疆、内蒙古、福建、广东等地已建成 26 个风电场,总装机容量近 50 万 kW。

(5)太阳能发电。太阳能也是一种洁净的可再生新能源,越来越受到人们的青睐。利用太阳能发电有两大类型:一类是太阳光发电(亦称太阳能光发电),它是将太阳能直接转变成电能的一种发电方式,包括光伏发电、光化学发电、光感应发电和光生物发电四种形式;另一类是太阳热发电(亦称太阳能热发电),它是先将太阳能转化为热能,再将热能转化成电能。太阳能热发电也有两种转化方式:一种是将太阳热能直接转化成电能(如半导体或金属材料的温差发

电,磁流体发电等);另一种方式是将太阳热能通过热机(如汽轮机)带动发电机发电。图 1-7 是太阳能发电原理图。

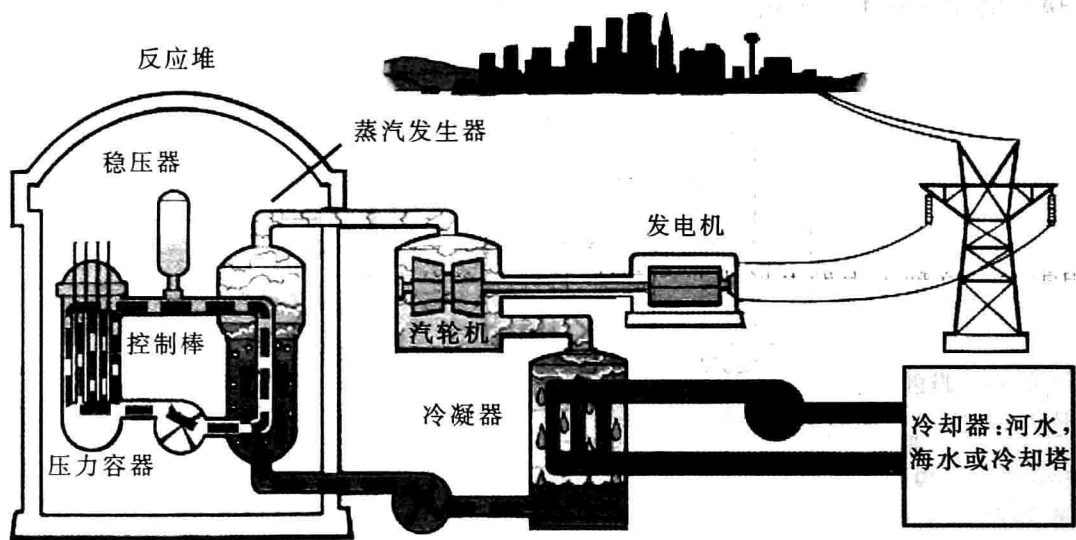


图 1-5 核电厂工作原理图

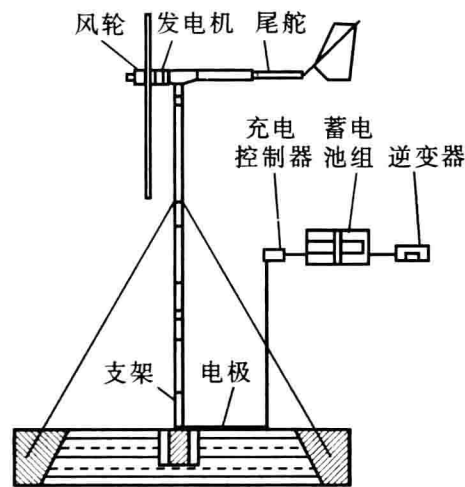


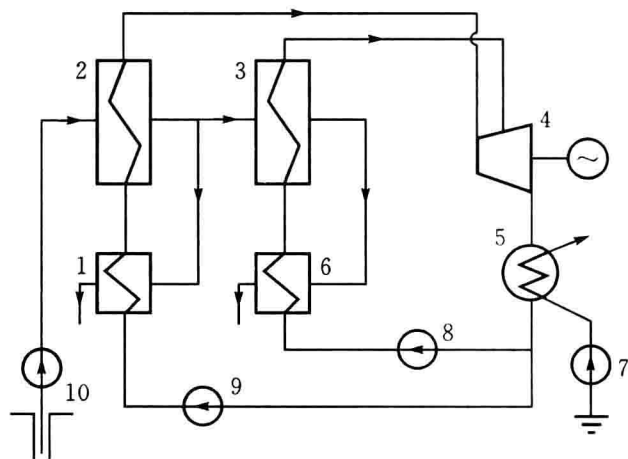
图 1-6 风力发电示意图



图 1-7 太阳能发电原理图

(6)地热发电。地热能是指储存在地球内部的可再生热能,地热能的开发技术也在日益完善。地热发电是利用地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术,其基本原理就是把地下的热能转变为机械能,然后再将机械能转变为电能的过程。随着对地热资源的不断开发与研究,地热能源必将成为继水力、风力和太阳能之后又一种重要的新能源。西藏的羊八井发电厂是中国最大的地热能发电厂,地热蒸汽温度高达 172°C ,采用二级扩容循环和混压式汽轮机,目前装机容量已达 25.15 MW。图 1-8 是双级扩容法地热水发电热力系统图。

(7)余热发电。余热发电的原理与火电厂基本相同,只是产生蒸汽的方式不同,它是利用生产过程中多余的热能(如石化厂、水泥厂等行业生产过程中产生的余热能量)通过汽轮发电机组转换为电能的技术。余热发电不仅节能,还有利于环境保护。



1—第一级预热器;2—第一级蒸发器;3—第二级蒸发器;4—汽轮发电机组;5—冷凝器;
6—第二级预热器;7—循环水泵;8—第二级工质泵;9—第一级工质泵;10—深井泵

图 1-8 双级扩容法地热水发电热力系统图

(8)磁流体发电。磁流体发电就是用燃料(石油、天然气、燃煤、核能等)直接加热易于电离的气体,使之在 $2\,000\,^{\circ}\text{C}$ 的高温下电离成导电的离子流,然后让其在磁场中高速流动时,切割磁力线,产生感应电动势,即由热能直接转换成电流。由于无需经过机械转换环节,所以称之为直接发电,其燃料利用率得到显著提高,这种技术也称为等离子体发电技术。

(9)新型海浪发电装置/海洋温差发电装置。海浪发电原理是利用海浪的上下垂直运动的能量(位移作为动力),转动水能发电机产生电能。海洋温差发电是利用海水表层与深层之间约 $20\,^{\circ}\text{C}$ 的温差能,通过使低沸点工质的蒸发与冷凝的热力过程,推动气轮机旋转并带动发动机发电。

(10)燃气-蒸汽联合循环发电。联合循环发电就是将燃气轮机排出的“废气”引入余热锅炉,加热水产生高温高压的蒸汽,再推动汽轮机做功。这样就形成了能源梯级利用的总能系统,可以达到较高的热效率(约 60%)。图 1-9 是燃气-蒸汽联合循环示意图。

在上述发电形式中,火力发电、核能发电、地热发电、余热发电以及燃气-蒸汽联合循环发电等装置中是离不开汽轮机这种能量转换设备的,因此,汽轮机制造业在未来较长时期内有很大的发展空间。

汽轮机的第二个用途就是驱动。作为原动机,汽轮机广泛应用于能源电力、舰船、化工、冶金、交通运输、国防等重要领域。在工业方面,可以驱动大型鼓风机、压缩机、风机和泵等动力设备;在舰船方面,可以驱动航空母舰、核潜艇、驱逐舰的螺旋桨等。

汽轮机为世界提供了约 70% 的电力(中国的火力发电电力所占比例更高达 $75\%\sim 80\%$),对世界经济具有重要的作用。

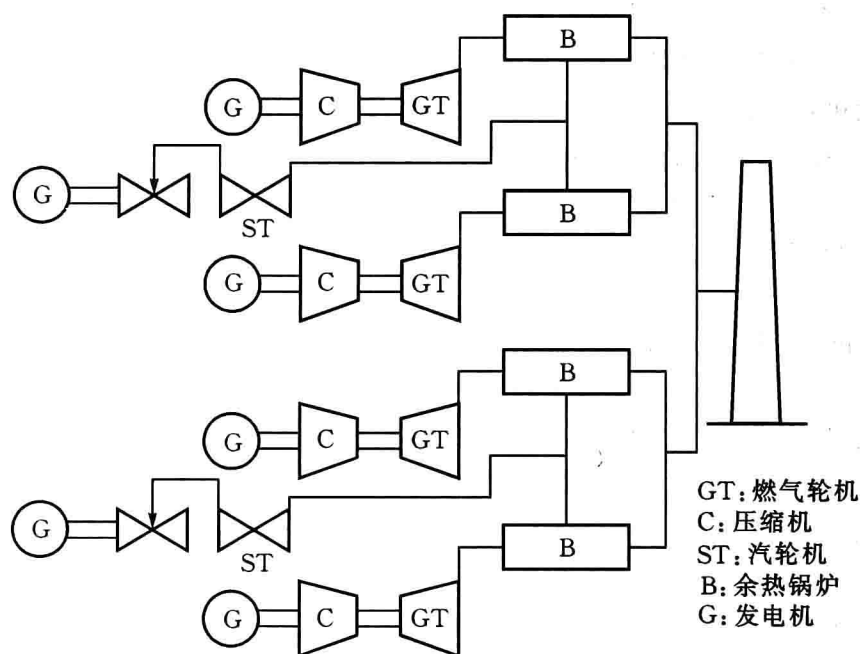


图 1-9 燃气-蒸汽联合循环示意图

1.3 汽轮机的分类与标准

1.3.1 汽轮机的分类

由于汽轮机在国民经济中的广泛应用,产生了多种用途、多种类型、多种参数和不同容量的汽轮机。为了便于了解、掌握与交流,将汽轮机进行了分类。按不同的分类方法,汽轮机可以分为以下几类。

(1)按工作原理分,有冲动式汽轮机和反动式汽轮机。

冲动式汽轮机:大多数级的蒸汽主要在喷管叶栅(或静叶栅)中进行膨胀的汽轮机。

反动式汽轮机:大多数级的蒸汽在喷管叶栅(或静叶栅)和动叶栅中都进行膨胀的汽轮机。

(2)按热力特性分,有凝汽式汽轮机、背压式汽轮机、抽汽式汽轮机和再热式汽轮机四种。

凝汽式汽轮机:排汽压力低于大气压力的汽轮机,需要凝汽器。

背压式汽轮机:将高于大气压力的排汽用于供热或其它用途的汽轮机,不需要凝汽器。

抽汽式汽轮机:从汽轮机某级后抽出部分蒸汽供用户使用的汽轮机,分一次抽汽汽轮机和二次抽汽汽轮机。

再热式汽轮机:把在汽轮机高压缸工作过的蒸汽引入锅炉的再热器中进行再加热,以提高蒸汽能量,然后再进入汽轮机的中、低压缸继续工作。

(3)按蒸汽流动方向分,有轴流式汽轮机和径流式汽轮机。

轴流式汽轮机:蒸汽基本上沿轴向流动的汽轮机。

径流式汽轮机:蒸汽基本上沿径向流动的汽轮机。

(4)按用途分,有火电汽轮机、核电汽轮机、舰(船)汽轮机和工业汽轮机四种。

火电汽轮机:在火力发电厂中带动发电机工作的汽轮机。

核电汽轮机:在核电站中带动发电机工作的汽轮机。

舰(船)汽轮机:驱动大型船舶、军舰的推进动力装置或螺旋桨等的汽轮机。

工业汽轮机:在工厂、企业中使用的汽轮机(发电或驱动)统称为工业汽轮机。

(5)按新蒸汽参数分,有以下几种。

超临界汽轮机:主蒸汽压力高于临界压力(一般高于 24.0 MPa,低于 28.0 MPa)的汽轮机。

亚临界汽轮机:主蒸汽压力接近于临界压力(一般高于 16.0 MPa,低于临界压力 22.1 MPa)的汽轮机。

超高压汽轮机:主蒸汽压力为 12.0~14.0 MPa 的汽轮机。

高压汽轮机:主蒸汽压力为 9.0 MPa 左右的汽轮机。

中压汽轮机:主蒸汽压力在 3.4 MPa 左右的汽轮机。

低压汽轮机:主蒸汽压力在 1.5 MPa 以下的汽轮机。

饱和蒸汽汽轮机或湿蒸汽汽轮机:主蒸汽为饱和或接近饱和状态的汽轮机。

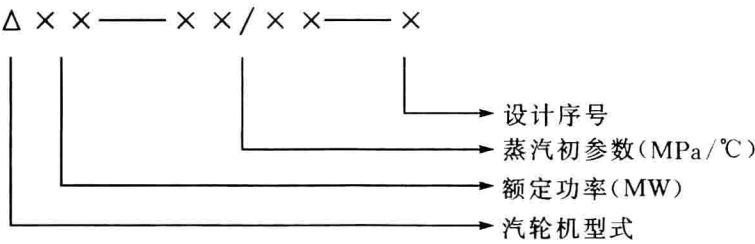
当然,上述参数范围的划分不是固定不变的。

为进一步提高汽轮机装置的循环热效率,更好地满足节能减排要求,汽轮机正向超超临界技术方向发展。目前,国内对超超临界汽轮机(ultra supercritical turbine)还没有统一的定义,通常认为主蒸汽压力达到 28.0 MPa 以上,或主蒸汽温度或/和再热蒸汽温度为 593℃及以上的汽轮机为超超临界汽轮机。

(6)其它分类方法。按汽缸的数目划分,有单缸汽轮机、双缸汽轮机和多缸汽轮机;按布置方式划分,有单轴汽轮机和双轴汽轮机;按转速划分,有定转速汽轮机和变转速汽轮机。

1.3.2 汽轮机的型号

汽轮机型号用下面的方式来表示。



其中,汽轮机的型式用汉语拼音的字母来表示,如表 1-1 所示。

表 1-1 汽轮机型式的表示符号

符 号	型 式	符 号	型 式
N	凝汽式汽轮机	HN	核电汽轮机
B	背压式汽轮机	G	工业汽轮机
C	一次抽汽式汽轮机	H	船(舰)用汽轮机
CC	二次抽汽式汽轮机	Y	移动式汽轮机
CB	抽汽背压式汽轮机		

示例 1: N300—16.7/538/538, 表示凝汽式汽轮机, 功率为 300 MW, 新蒸汽压力为 16.7 MPa, 温度为 538 °C, 再热后蒸汽温度为 538 °C。

示例 2: CB25—8.83/1.47/0.49, 表示抽汽背压式汽轮机, 功率为 25 MW, 新蒸汽压力为 8.83 MPa, 抽汽压力为 1.47 MPa, 排汽压力为 0.49 MPa。

示例 3: CC12—3.43/0.98/0.118, 表示两次调节抽汽式汽轮机, 功率为 12 MW, 新蒸汽压力为 3.43 MPa, 高压抽汽压力为 0.98 MPa, 低压抽汽压力为 0.118 MPa。

1.4 热力循环和汽轮机的基本结构

1.4.1 热力循环

为了提高汽轮机工质热力循环的热效率, 现代电厂凝汽式汽轮机装置采用了各种复杂的热力循环系统, 这些热力循环系统都是以简单的朗肯循环为基础发展而来的。图 1-10 是简单蒸汽热力循环(朗肯循环)装置示意图。在汽轮机装置中, 有四个最主要的设备:

(1) 锅炉。锅炉是产生高温高压蒸汽的设备, 水或蒸汽在锅炉中是等压吸热过程, 由未饱和水最终变为过热蒸汽, 这一过程中工质与外界无技术功的交换。

(2) 汽轮机。汽轮机是利用蒸汽膨胀并对外做功的设备, 蒸汽在汽轮机中是膨胀过程。

(3) 凝汽器。凝汽器是使工质向外界冷源放热的设备, 汽轮机的排汽进入凝汽器内对冷却介质放热并凝结成凝结水, 是等压放热过程。

(4) 给水泵。给水泵消耗一部分功将凝结水压力提高并再次送入锅炉, 完成热力循环中的压缩过程。

汽轮机装置中的其它机械设备, 基本上都是服务于锅炉、汽轮机和凝汽器三大设备的。

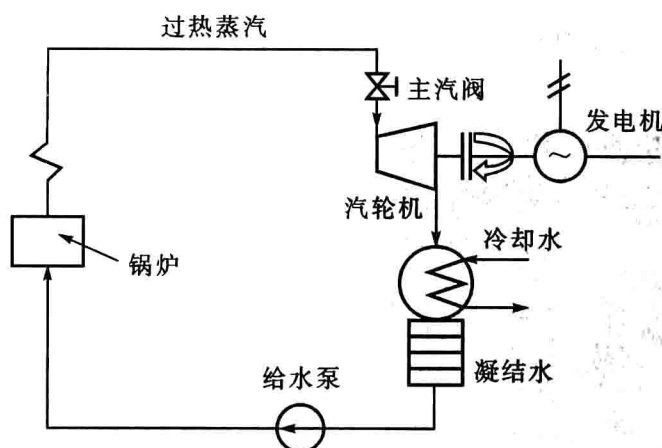


图 1-10 简单蒸汽热力循环装置示意图

1.4.2 汽轮机的基本结构

一台完整的汽轮机包含许多零部件, 如汽轮机的主汽阀、调节阀、进汽部分、通流部分和排汽部分, 调节系统和保安系统, 轴承及轴承箱, 汽封装置, 支架, 盘车装置, 辅助系统等。

图 1-11 是汽轮机的结构示意图。图中的主要零部件在汽轮机中有各自的作用和功能,下面以一台冲动式汽轮机为例,简要介绍汽轮机的基本零部件名称及含义。

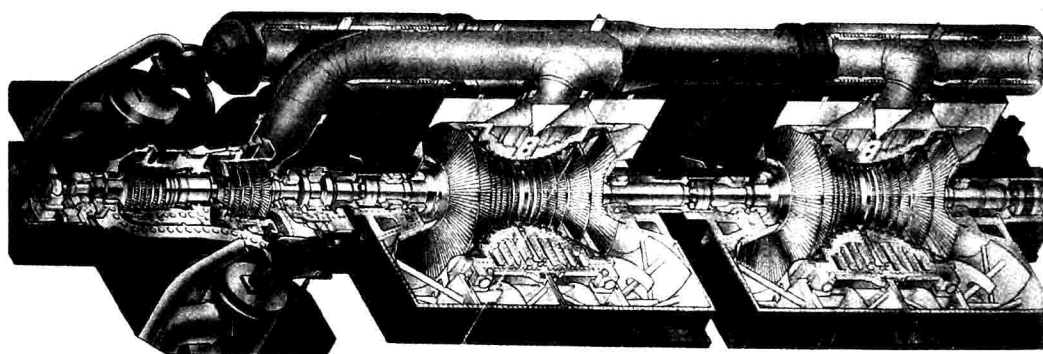


图 1-11 汽轮机的结构图

(1) 叶片。汽轮机中的叶片包含喷管叶片(或叫静叶片)和工作叶片(动叶片)。叶片的作用是构成叶栅,形成特殊几何形状流道并使蒸汽能够进行能量转换,如图 1-12 所示。

(2) 汽轮机级。汽轮机的基本工作单元叫作级。在多级汽轮机中,喷管调节汽轮机的第一个级既对外做功,也用来调节汽轮机的流量和功率,称为调节级;汽轮机最后一个级称为末级,其排汽通过排汽道进入凝汽器凝结成凝结水或引入其它用汽地方;调节级和末级以外的其它所有汽轮机级的统称为中间级。

(3) 汽轮机通流部分。它是指蒸汽流动和进行能量转换的区域,由若干个汽轮机级组成。

(4) 静止部分。汽轮机在工作时,所有静止不动的部分统称为静止部分(或静子)。

(5) 转动部分。汽轮机在工作时,所有旋转的部分称为转动部分(或转子)。

汽轮机的静子部分主要包含汽缸、喷嘴箱、隔板和支撑轴承、推力轴承等。

汽缸的形状呈圆柱型或圆锥型,是结构形状非常复杂的部件,如图 1-13 所示,其作用是构成一个与大气隔开的封闭空间。汽缸一般具有水平中分面,分为上汽缸和上汽缸。汽轮机总装时,在汽轮机内部的零部件安装调整完成后,在上、下汽缸的法兰处用螺栓固紧形成一个完整的汽缸。

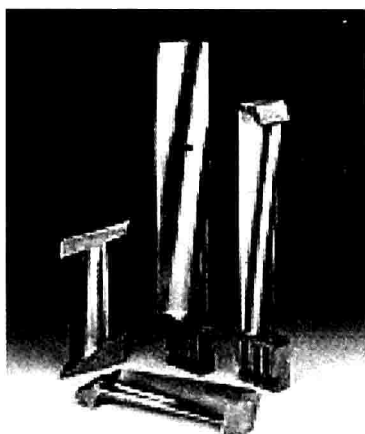


图 1-12 不同结构的单个叶片

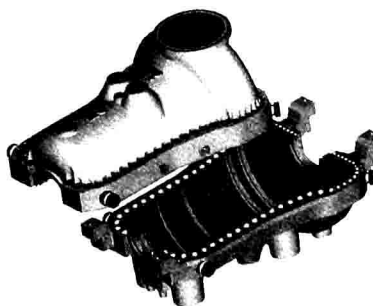


图 1-13 上汽缸和上汽缸

在汽轮机调节级中,喷嘴叶栅一般不是直接安装在汽缸上,而是装在一个与汽缸分开制造的弧形喷嘴箱上,喷嘴箱安置在汽缸上的专用孔口中,如图 1-14 所示。采用单独的喷嘴箱,

可以使高压高温新蒸汽先进入喷嘴箱的汽室,而不与汽缸直接接触,经第一级喷嘴膨胀后,使蒸汽压力和温度降低才进入汽缸。优点是可以减小汽缸所受的热应力;减薄汽缸的厚度或降低汽缸的使用材料性能要求;减少汽轮机高压端的漏汽。

隔板的作用是把汽缸所围成的封闭空间,沿主轴方向分成若干个相互串联、不同压力的汽室。通常隔板本身则是由隔板体、静叶栅、隔板外环以及隔板汽封组成,如图1-15所示。为了总装的需求,隔板也分为上隔板和下隔板。上隔板安装在上汽缸上,下隔板安装在下汽缸上。



图1-14 安置了喷嘴箱的汽缸照片图

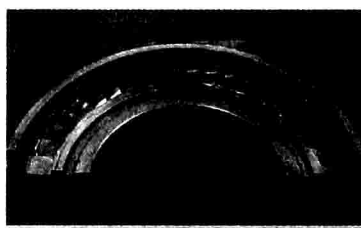


图1-15 半个隔板照片图

支持轴承和推力轴承也是静止部分的部件。其中,支持轴承用来承受转子的重量和部分进汽时作用在转子的附加力,以保持转子与静子之间的相对位置;推力轴承则用来承受汽轮机转子轴向载荷,以保持转子的轴向位置。

汽轮机的转动部分主要包含主轴、轮盘、动叶片、推力环、联轴节等与主轴相连接的零部件。按不同的分类标准,汽轮机转子有许多种。按照结构,汽轮机转子可分为轮盘式转子和鼓筒式转子;按制造方法,汽轮机转子可分为整锻式转子、焊接式转子和组合式转子;按转速,汽轮机转子可分为刚性转子和柔性转子。图1-16是汽轮机组合式转子的示意图。

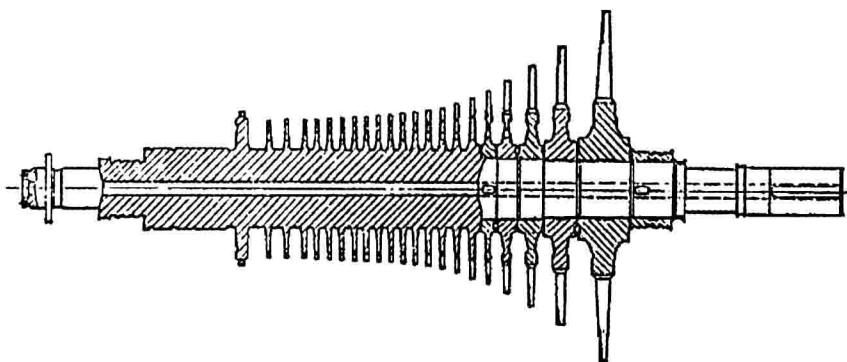


图1-16 汽轮机的转子剖面图

轮盘包含轮缘、轮毂和轮辐。轮毂是轮盘与主轴相接的部分;轮辐是连接轮缘与轮毂的部分;动叶片安装在轮盘外缘部分的轮缘上。

图1-17是汽轮机的总装图,从图中大体可以看出各零部件的相互位置与关系。