



燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答

燃气轮机和蒸汽轮机 设备与运行

丛书主编 张 磊

主 编 李广华

副 主 编 张雪然 邵德让 王华告

刘培勇 曹西忠



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答

燃气轮机和蒸汽轮机 设备与运行

丛书主编 张 磊
主 编 李广华
副 主 编 张雪然 邵德让 王华告
刘培勇 曹西忠



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

由于我国大容量、高参数的燃气-蒸汽联合循环发电机组的装机容量逐年上升,为满足广大生产管理人员和专业技术人员对新知识、新技能的需要,特组织编写了《燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答》丛书。

本套书采用问答形式编写,以岗位技能为主线,理论突出重点,实践注重技能。

本书为《燃气轮机和蒸汽轮机设备与运行》分册,针对大型燃气-蒸汽联合循环发电机组中的燃气轮机和蒸汽轮机,系统地阐述了联合循环发电厂中的燃气轮机和蒸汽轮机的结构、运行原理及故障分析与处理。全书共分四部分,第一部分是岗位基础知识;第二部分是燃气轮机及其辅助设备结构及工作原理;第三部分是燃气轮机运行岗位技能知识,包括燃气轮机、蒸汽轮机系统的运行原理和运行所必须遵守的规程、规定;第四部分是故障分析与处理。

本书适用于从事大型燃气-蒸汽联合循环电厂设计、安装、调试、运行、检修的技术人员和管理人员使用,也可供高等院校热能及动力类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机和蒸汽轮机设备与运行/李广华主编. —北京:中国电力出版社, 2015.7

(燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答/张磊主编)

ISBN 978-7-5123-7251-1

I. ①燃… II. ①主…②李… III. ①燃气-蒸汽联合循环发电-发电设备-问题解答 IV. ①TM611.31-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 035827 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 7 月第一版 2015 年 7 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 17 印张 406 千字

印数 0001—3000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 任 张 磊

副主任 (按姓氏笔画排序)

李广华 时海刚 张 嵩 单志栩

成 员 (按姓氏笔画排序)

王 旭 王华告 王合录 王学训

王新举 史国梁 田韵法 孙华强

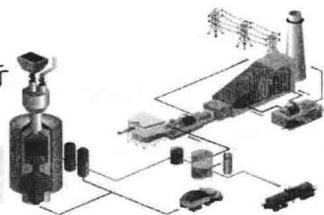
刘培勇 李 芳 李大俊 李秀英

吴 华 张乃强 张亚娟 张雪然

邵德让 孟庆臣 赵建文 曹西忠

黄改云 潘 淙

- 燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答
燃气轮机和蒸汽轮机设备与运行



前言 >>

当前我国对能源需求迅猛增长，天然气资源进入大规模开发利用阶段，大容量、高参数的燃气-蒸汽联合循环发电机组的装机容量逐年上升。燃气-蒸汽联合循环是把燃气轮机循环和蒸汽轮机循环组合在一起进行能量梯级利用，从而将热功转换效率提高至接近 60%。这种技术燃烧清洁能源，降低污染物排放，符合我国节约能源、保护环境战略，是集新技术、新材料、新工艺于一身的国家高技术水平和科技实力的重要标志之一。

预计到 2020 年，我国燃气-蒸汽联合循环装机容量将达到 5500 万 kW，是 1951~2000 年已建成的同类机组装机容量的 25 倍。为满足广大生产管理人员和专业技术人员应对新知识、新技术带来的需要，国网技术学院组织并与有关企业合作编写了《燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术问答》丛书，包括《燃气轮机和蒸汽轮机设备与运行》、《余热锅炉设备与运行》、《电气设备与运行》和《热工仪表及控制》四个分册。

本丛书适应时代发展需要，减少了基础理论知识所占比重，突出了大型燃气-蒸汽联合循环的运行技术，以实用和提高技能为核心，针对余热锅炉、燃气轮机及压气机、汽轮机、电气以及仪表和控制系统的设备原理、结构、运行技巧等方面，展开岗位应知应会知识问答，填补了关于大型燃气-蒸汽联合循环发电机组运行技术培训教材的市场空白。

本书为《燃气轮机和蒸汽轮机设备与运行》分册，由国网技

术学院的李广华、张雪然；山东电力建设第一工程公司邵德让、王华告、刘培勇、王合录；山东钢铁股份有限公司曹西忠；华电国际邹县发电厂孟庆臣合作编写完成。其中李广华为主编；张雪然、邵德让、王华告、刘培勇、曹西忠为副主编；王合录、孟庆臣参加编写。

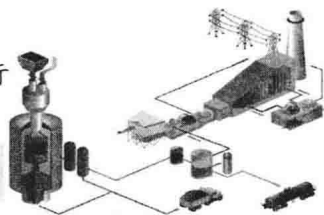
本丛书由国网技术学院张磊担任丛书主编并统稿。

编书过程中受到北京京能国际能源股份有限公司、山东华能集团公司、山东电力建设第一工程公司、山东钢铁厂、山东电力集团总公司等企业大力支持，借此深表感谢。

由于编写人员水平所限，疏漏和不足之处敬请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 5 月



目 录 »

前言

第一部分 岗位基础知识

第一章 岗位必备理论基础知识	3
1-1 什么是工质？联合循环发电厂的热机通常采用什么作为工质？	3
1-2 描述工质状态的参数有哪些？分别解释常用状态参数温度、压力。	3
1-3 压力有哪几种不同表示方法，相互关系是什么？	4
1-4 常见的压力单位有哪些？如何换算？	4
1-5 什么是比体积？和密度之间的关系是什么？	5
1-6 什么是标准状态？	5
1-7 实现热功转换的过程中，常见能量形式有哪些？	5
1-8 什么是热量？什么是功？什么是功率？	6
1-9 什么是热机？	6
1-10 什么是比热容？常见比热容及其相互关系是什么？影响比热容的主要因素有哪些？	6
1-11 如何用定值比热容计算热量？	7
1-12 什么是内能？什么是焓？	7
1-13 什么是熵？	7
1-14 电厂中哪些气体可看作理想气体？哪些气体需看作实际气体？	8
1-15 热力学第一定律的实质是什么？表达式是怎样的？	8
1-16 什么是不可逆过程？常见的热力过程有哪些？	9

1-17	简述热力学第二定律。	9
1-18	什么是卡诺循环? 为什么说卡诺循环指明了提高循环热效率的方向?	10
1-19	什么是汽化? 什么是凝结?	10
1-20	简述水的定压汽化过程中的一点、五态。	10
1-21	什么是干度? 什么是湿度? 干度的作用是什么?	11
1-22	什么是热力循环? 什么是正向循环? 如何确定循环的热效率?	11
1-23	什么是稳定流动? 什么是轴功? 什么是膨胀功? 写出稳定流动的热力学第一定律表达式。	12
1-24	热量传递的形式有哪些? 各自特点是什么?	12
1-25	什么是稳定传热? 什么是不稳定传热?	12
1-26	什么是导热系数? 什么是热绝缘材料? 常见热绝缘材料有哪些?	13
1-27	什么是对流换热? 影响对流换热的因素有哪些?	13
1-28	如何区分管内流体的流动状态?	14
1-29	何谓流量? 常见流量表示方法及其关系是什么?	14
1-30	何谓水锤? 有何危害? 如何防止?	15
1-31	何谓金属的机械性能? 各个性能参数所用的指标是什么?	15
1-32	简述金属变形过程中的三个阶段。	16
1-33	何谓疲劳和疲劳强度?	16
1-34	什么是热应力? 什么是热冲击?	17
1-35	造成汽轮机热冲击的原因有哪些?	17
1-36	什么是热疲劳、蠕变、应力松弛?	18
1-37	蒸汽如何把热量传递给汽轮机金属部件表面?	18
1-38	什么是准稳态点、准稳态区? 为什么需要注意准稳态区?	19
1-39	常见热工测量仪表有哪些?	19
1-40	什么是允许误差? 什么是精确度?	19

1-41	如何选择压力表的量程？	20
1-42	简述双金属温度计的测量原理。	20
1-43	何谓热电偶？	20
1-44	什么是继电器？有哪些分类？	20
第二章	岗位必备联合循环基础知识	22
第一节	基本燃气轮机联合循环	22
2-1	什么是理想燃气轮机循环？请绘出理想燃气轮机循环的热力系统图。	22
2-2	写出图 2-1 所示的理想燃气轮机循环的热力过程。	22
2-3	在 p - V 图和 T - s 图上绘出题 2-2 所述理想燃气轮机循环的热力过程。	23
2-4	实际的简单燃气轮机循环和理想循环相比有何不同？	23
2-5	什么是基本蒸汽动力循环（朗肯循环）？请绘制基本蒸汽动力循环系统图。	23
2-6	写出图 2-3 所示的理想蒸汽动力循环的热力过程。	23
2-7	燃气轮机循环和蒸汽动力循环在提高循环热效率方面的困难是什么？	24
2-8	什么是燃气-蒸汽联合循环？请绘制燃气-蒸汽联合循环系统图。	24
2-9	描述图 2-4 所示的燃气-蒸汽联合循环的热力过程。	25
2-10	什么是联合循环？	25
2-11	什么是联合循环的前置循环？后置循环？二者如何耦合？	25
2-12	简述采用燃气-蒸汽联合循环的热力学意义。	26
2-13	采用燃气-蒸汽联合循环的优点有哪些？	26
2-14	燃气-蒸汽联合循环发展趋势是什么？	26
2-15	为什么燃气-蒸汽联合循环应用广泛？	26
2-16	燃气-蒸汽轮机联合循环的常用性能指标是什么？	27
2-17	影响实际循环效率的主要因素有哪些？	27
2-18	什么是压缩比？	27

2-19	什么是温度比？	27
2-20	什么是效率最佳压比？	27
2-21	什么是比功最佳压比？	27
第二节 联合循环的类型		28
2-22	什么是有回热的燃气-蒸汽循环？	28
2-23	绘制有回热的燃气-蒸汽循环的热力系统简图。	28
2-24	什么是中间冷却燃气-蒸汽循环？	28
2-25	绘制中间冷却燃气-蒸汽循环系统图。	28
2-26	什么是有再热的燃气-蒸汽循环？	28
2-27	绘制有再热的燃气-蒸汽循环系统示意图。	29
2-28	燃气-蒸汽联合循环的类型有哪些？	29
2-29	余热锅炉型联合循环和补燃型余热锅炉的不同是什么？	30
2-30	什么是增压锅炉型联合循环？	30
2-31	根据锅炉类型可将燃气-蒸汽联合循环分为哪些 类型？	30
2-32	绘制补燃余热锅炉型联合循环的热力系统图。	30
2-33	简述图 2-8 所示的补燃余热锅炉型联合循环的热力 过程。	31
2-34	简述补燃余热锅炉型联合循环的优缺点。	31
2-35	绘制理想增压锅炉型联合循环的热力系统图。	31
2-36	简述图 2-9 所示的理想增压锅炉型联合循环的热力 过程。	31
2-37	简述理想增压锅炉型联合循环的优缺点。	32
2-38	什么是 PFBC-CC？	32
2-39	什么是 IGCC？	33
2-40	IGCC 怎样实现洁净煤发电？	33
2-41	绘制 IGCC 发电系统示意图？	33
2-42	简述图 2-10 所示的 IGCC 热力过程。	33
2-43	什么是程氏循环？	34
2-44	绘制程氏循环的热力系统图？	34

2-45	与余热锅炉循环相比,程氏循环的最大特点是什么?	34
2-46	与采用空气回热的燃气轮机循环相比,程氏循环的特点 是什么?	34
2-47	简述程氏循环的优缺点。	35
2-48	什么是 HAT 循环? 绘制 HAT 循环的热力系统图。	35
2-49	根据设备组合情况,热电联产的燃气-蒸汽联合循环类型 有哪些?	35
2-50	什么是功热比?	36
2-51	热电联产燃气-蒸汽联合循环适用场合有哪些?	36
2-52	影响燃气轮机性能指标的因素有哪些?	36
2-53	对燃气轮机热效率影响程度的顺序是什么?	36
2-54	燃气轮机初温的定义方法?	36
2-55	GE 公司对燃气轮机初温定义采用哪种方法?	37
2-56	大气温度对简单循环和联合循环的功率与效率有影响的 原因是什么?	37
2-57	余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环具有哪些优点?	37
2-58	联合循环机组和常规蒸汽循环机组的汽水系统的差别主要 体现在哪里?	37
2-59	燃气-蒸汽轮机联合循环中对应的损失有哪些?	38
2-60	对于余热锅炉型联合循环,试分析燃气轮机、汽轮机和 余热锅炉效率对循环的影响。	38
2-61	简述制天然气、空气和燃气的流程。	38
2-62	说明联合循环燃气流程中各设备的作用。	38
2-63	绘制燃气轮机循环机组的汽水流程图。	39
2-64	说明燃气轮机联合循环汽水流程中工质系统流程及各主要 设备的作用。	39

第二部分 燃气轮机及其辅助设备结构及工作原理

第三章 燃气轮机的整体结构

第一节 燃气轮机的整体布置

3-1	简述电厂燃气轮机的组装式快装机组。	43
3-2	标示图 3-2 所示的联合循环主要设备名称。	43
3-3	燃气轮机的整体布置指什么？	43
3-4	燃气轮机整体结构布置的发展趋势是什么？	44
3-5	简述燃气轮机整体布置的注意事项。	44
3-6	发电机有哪些连接方式？	44
3-7	什么是一拖一方案？	44
3-8	什么是二拖一方案？	45
3-9	什么是三拖一方案？	45
3-10	什么是单轴布置方案？	45
3-11	试绘制分轴布置一拖一机组整体布置示意图。	45
3-12	试绘制分轴布置二拖一机组整体布置示意图。	45
3-13	什么是双轴方案？	46
3-14	从燃气轮机整体布置和安装方面需考虑什么？	46
第二节	转子的支承和定位	46
3-15	单轴燃气轮机常见的支承布置方案有哪些？	46
3-16	单轴燃气轮机为什么多采用双支点支承？	47
3-17	简述燃气轮机循环的主要系统组成。	47
3-18	为什么将燃气轮机布置在封闭的燃气轮机车间内？	47
3-19	为防止天然气爆炸产生危害，燃气轮机循环机组应采用 哪些安全措施？	48
3-20	绘图说明分轴式燃气轮机的支承方案。	48
3-21	以 S109FA 燃气-蒸汽联合循环发电机组为例介绍单轴 机组的整体布置情况。	48
3-22	简述燃气轮机装置单轴布置的优缺点。	49
3-23	对燃气轮机整体固定的要求是什么？	49
3-24	什么是机组死点？为什么要设置死点？	49
3-25	怎样实现机组的死点？	49
3-26	如何选择死点的位置？	49
3-27	常见燃气轮机支撑结构有哪些？	50

3-28	采用支座支撑应注意什么问题？	50
3-29	什么是弹性支撑板？	50
3-30	机组采用支座和弹性板共同支撑时是怎么布置的？	50
3-31	为什么有些燃气轮机要设置辅助支撑？	50
3-32	什么是导键？有哪些不同型式？	50
3-33	燃气轮机设置底盘的作用是什么？为什么要设置 底盘？	51
3-34	简述 9E 燃气轮机的整体支撑基础。	51
3-35	简述 9E 燃气轮机透平的支撑。	51
3-36	简述 9E 燃气轮机透平的前支撑。	51
3-37	简述 9E 燃气轮机透平的后支撑。	51
3-38	简述燃气轮机支承上的凹型扁销和导向块的作用。	52
第三节 燃气轮机的轴承和轴承座		52
3-39	重型燃气轮机通常采用什么轴承？	52
3-40	简述径向轴承的作用和类型。	52
3-41	简述圆柱形轴承的工作原理。	52
3-42	标注图 3-8 所示圆柱轴承中各处名称。	53
3-43	简述图 3-8 所示滑动轴承的润滑过程。	53
3-44	如何保证转子和静子同心？	53
3-45	简述轴承止动圈的作用。	53
3-46	简述圆柱形轴承的优缺点。	54
3-47	简述椭圆轴承的特点。	54
3-48	简述多油楔轴承的特点。	54
3-49	什么是可倾瓦轴承？	54
3-50	根据图 3-9 所示可倾瓦结构图说明可倾瓦的类型。	55
3-51	燃气轮机怎样平衡轴向推力？	55
3-52	简述推力轴承的作用。	55
3-53	简述推力瓦的作用。	55
3-54	什么是联合轴承？	55
3-55	什么是轴承座？	56

3-56	轴承座应满足哪些要求？	56
3-57	轴承座有哪些型式？	56
3-58	标示图 3-11 所示放置在水平法兰上的轴承座的结构名称。	56
3-59	简述放置在水平法兰上的轴承座的支撑原理。	57
3-60	如何将轴承座所受的力传至外部静子？	57
3-61	简述轴承座密封的作用。	57
3-62	什么是油封？简述油封的结构及密封原理。	57
3-63	引气封气的油封如何工作？	58
3-64	什么是轴封的密封空气，作用是什么？	58
3-65	转子连接构架需考虑哪些因素？	59

第四章 燃气轮机本体各部件结构 60

第一节 电厂燃气轮机结构 60

4-1	燃气轮机的设备组成及其作用是什么？	60
4-2	燃气轮机与压气机的区别是什么？	60
4-3	燃机燃用轻油和重油有什么不同？	61
4-4	对轴流式燃气轮机的性能有哪些要求？	61
4-5	燃气透平配置了哪些保护？	61
4-6	引起燃气轮机爆燃的原因有哪些？怎样预防燃气轮机爆燃？	62
4-7	电子超速保护的作用是什么？	62
4-8	超温保护的作用是什么？	62
4-9	振动传感器的类型有哪些？	62
4-10	振动对燃气轮机的影响有哪些？	62
4-11	简述燃烧监测保护的必要性。	63
4-12	什么是热悬挂？应如何克服？	63
4-13	进气压损和排气压损对燃机有什么影响？	63
4-14	IGV 是什么？燃气轮机 IGV 的作用有哪些？投入 IGV 温控对燃气轮机和汽轮机分别有什么影响？	64
4-15	简述 IGV 温控的作用。	64

4-16	FSR 是什么? FSRT 温控的作用是什么?	64
4-17	9E 燃气轮机透平的组成及各部件的功能是什么?	65
4-18	说明 PG9171E 型燃气轮机型号中各参数的意义。	65
4-19	燃气透平的作用是什么?	65
4-20	9E 燃气轮机透平部分主要包括哪些设备?	65
4-21	简述 9E 燃气轮机透平转子的结构。	65
4-22	简述 9E 燃气轮机透平的动叶特点。	66
4-23	9E 燃气轮机透平是如何进行冷却的?	67
4-24	简述 9E 燃气轮机透平静子的结构。	67
4-25	简述 9E 燃气轮机透平缸体的结构和作用。	67
4-26	简述 9E 燃气轮机透平喷嘴的结构和作用。	67
4-27	简述 9E 燃气轮机透平喷嘴隔板的结构和作用。	68
4-28	简述 9E 燃气轮机透平复环的结构和作用。	68
4-29	简述 9E 燃气轮机透平排气框架的结构和作用。	69
4-30	9E 燃气轮机透平采用的轴瓦是什么类型的, 有何特点?	69
4-31	9E 燃气轮机透平 1 号轴瓦有什么特点?	69
4-32	9E 燃气轮机透平 2 号轴瓦有什么特点?	70
4-33	9E 燃气轮机透平 3 号轴瓦有什么特点?	70
4-34	9E 燃气轮机透平的 3 个轴瓦是怎样进行润滑的?	71
4-35	9E 燃气轮机透平轴瓦所用的油封的作用, 是如何实现的?	71
4-36	说明 109FA 机组的转子膨胀死点和汽缸膨胀死点的位置。	72
4-37	说明 109FA 机组轴承的编号和轴承类型。	72
第二节 压气机结构		72
4-38	什么是压气机的级?	72
4-39	燃气轮机压气机进口可转导叶的作用是什么?	72
4-40	描述压气机叶型特征的几何参数有哪些?	72
4-41	什么是叶栅?	73

4-42	描述叶栅的主要几何参数有哪些？	73
4-43	什么是最大压比？	73
4-44	整个压气机分为几部分？	73
4-45	压气机的作用是什么？	73
4-46	压气机损失有几种？	73
4-47	压气机内部损失有几种？	74
4-48	气流在压气机内的损失有哪些？	74
4-49	压气机外部损失有几种？	74
4-50	什么是喘振？	74
4-51	设计时防止压气机喘振的措施有哪些？	75
4-52	什么是喘振边界线？	75
4-53	简述轴流式压气机的级中空气增压的过程。	75
4-54	反动度的定义是什么？	76
4-55	什么是压气机的特性曲线？	76
4-56	防喘放气阀门在启停过程中是如何动作的？	76
4-57	压气机进口可转导叶的作用是什么？	76
4-58	可转导叶控制系统的两种不同控制方式是什么？	76
4-59	可转导叶的动作机理是什么？	76
4-60	FSR 温控与可转导叶的温度控制有何不同？	77
4-61	对于 9FA 机组正常启停机过程中可转导叶是如何变化的？	77
4-62	蓄能器对 IGV 系统有什么作用？	77
4-63	IGV 系统中孔板的主要作用是什么？	77
4-64	IGV 系统中反馈装置有什么作用？	77
4-65	何谓轴流式压气机？ 组成部件有哪些？	78
4-66	压气机进口气流的正冲角过大会会有什么危害？	78
4-67	轴流式压气机的主要性能参数有哪些？	78
4-68	正常启动过程中防喘放气阀在什么情况下关闭？	78
4-69	压气机进口导叶 IGV 控制的作用有哪些？	78
4-70	常见压气机的类型和特点是什么？	79

4-71	压气机转子采用盘鼓式结构有什么好处？	79
4-72	压气机的动叶和静叶分别是如何冷却的？	79
4-73	轴流式压气机的主要部件有哪些？	80
4-74	为防止压气机喘振采取了哪些措施？	80
4-75	简述采用中间放气阀防止喘振的优缺点。	80
4-76	有些压气机在第 9 和第 13 级设置抽气，其作用是什么？	80
4-77	有些压气机在 17 级轮毂上开径向抽气槽，其作用是什么？	80
4-78	简述压气机内空气如何获得能量。	80
4-79	压气机转子由哪些部件组成？	81
4-80	什么是压气机的失速？	81
4-81	简述 9E 燃气轮机的轴流压气机的结构。	81
4-82	简述压气机转子的结构及各组件的组成。	81
4-83	压气机转子的各级是怎样进行能量传递的？	82
4-84	简述压气机静子的组成部件及作用。	82
4-85	9E 燃气轮机的压气机叶片有什么特点？	83
4-86	取自 9E 燃气轮机的压气机抽气有什么作用？	83
4-87	取自 9E 燃气轮机的压气机抽气取自哪里？	83
4-88	简述水洗喷口的作用和组成。	84
4-89	9E 燃气轮机压气机的组成及各部件的功能是什么？	84
第三节 燃烧室结构		85
4-90	燃烧系统包括哪些部件？	85
4-91	燃烧室的功能是什么？	85
4-92	燃气轮机燃烧室的工作过程有哪些特点？	86
4-93	燃烧室的作用是什么？	86
4-94	对燃烧室有哪些基本要求？	86
4-95	根据结构特点可以将燃烧室分成哪几类？	86
4-96	简述圆筒形燃烧室的基本结构及其优缺点。	86
4-97	简述分管型燃烧室的基本结构及其优缺点。	87