

单元发电机组 汽轮机启动工况

〔苏〕E.P.普罗特金 A.И.列依泽罗维奇
夏同棠译 任曙校

水利电力出版社

内 容 提 要

本书论述火电站和核电站大容量单元汽轮发电机组启动工况的研究方法和研究结果, 选择合理启动操作流程和最优化启动曲线, 以及启动工况自动控制操作流程的原则等问题。

书中分析限制汽轮机启动速度的主要因素和主要结构部件的热应力状态, 叙述组织和进行启动试验的方法, 研究启动工况在汽轮机设计和改型时对选择结构方案的影响。

本书可供电站、设计和安装调试单位、科学研究机构和汽轮机制造厂的工程技术人员, 以及高等院校师生参考。

Е.Р.Плоткин, А.Ш.Лейзерович
Пусковые Режимы Паровых Турбин Энерго-блоков
Издательство «Энергия» 1980

单元发电机组汽轮机启动工况

[苏]Е.Р.普罗特金 А.Ш.列依泽罗维奇

夏同荣 译 任 校

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 8.625印张 226千字
1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—2180册 定价2.45元

书号 15143·5747

前 言

如何组织单元汽轮发电机组大容量汽轮机的启动工况，是火电站和核电站最重要的问题之一。当前，由于电力系统负荷密集度的降低、单元机组装机容量所占份额的提高和单元机组启动及停机备用次数必然增加等，与启动工况紧密相关的汽轮机的机动性和可靠性，就成为特别紧迫的问题。

虽然有大量文献论述大容量汽轮机的启动工况及其最优化问题。但是，已经公开的文献（主要是杂志文章），通常只讨论某一汽轮机的某一个局部问题。此外，对于所讨论问题的解决办法，不同组织机构也大不相同。在许多场合，研究是单纯依靠经验并以过份简化所研究过程的物理概念为基础而进行的。这种简化了的概念与目前已经掌握的知识水平极不相符，因为它没有考虑现代计算技术和实验理论所提供的宽广途径和丰富内容。这样，一方面使所取得的试验结果显得贫乏；另一方面由于在实物设备上进行费用昂贵，工作繁重的试验使工作量徒然增加，而所取得的试验结果又难以应用于其它汽轮机。

为了提高研究启动工况的成效，必须对启动过程中汽轮机主要结构部件的加热边界条件、温度状态和热应力状态的试验资料和计算数据进行系统化并加以概括。吸取研究启动工况积累的经验，利用大量储存的全部研究方法，其中包括计算方法和数学模拟方法等，才能拟订出选择合理启动操作和构成最优化启动曲线的基本原则。最终，这个大容量汽轮机启动工况的理论问题，可以作为需要创建的并要在实际中应用的问题而提出。创建这种理论的本身，要求对启动过程中汽轮机部件的加热过程和热应力状态变化的物理形象，有十分明确的概念。应指出，单元汽轮机组的启动工况问题，应该和单元发电机组启动的普遍性问题，作为

一个整体来考虑。

解决上述所提出的问题，不仅对于制订最优化启动工况是必要的，对于研制汽轮机的新结构，满足变动工况运行的要求和研制单元机组自动控制操作流程的装备和计算方法，也是必要的。今天，没有自动控制装备和计算方法，就不能满足对汽轮机机动性和可靠性提出的这样高的要求。最后，为了对火电站和核电站的动力设备实行科学管理并保证其安全运行，也必须清晰地了解汽轮机在动工况中所发生的各种现象。

本书试图解决上面所提出的问题。它所研究的目标是苏联制造的现代火电站和核电站的典型汽轮机，其单机容量的范围为16~80万千瓦，同时还考虑了它们的热力系统和结构的特点。

本书由五部分构成。第一部分序论，简要叙述电力系统单元发电机组的工作条件、苏联制造的单元发电汽轮机组的结构特点和典型启动系统的特点，以及启动工况操作流程的一般说明。第二部分论述研究汽轮机部件温度状态和应力状态的方法，以及部件的可靠性准则。第三部分讨论启动过程中，汽轮机主要结构部件的温度场、应力和应变的试验和计算研究结果。第四部分阐述最优化启动工况的制订，其中包括汽轮机状态监控的组织、合理启动操作流程的选择、启动工况的最优化计算方法、启动工况自动化操作流程的原则，以及进行试验的方法。如果前四部分讨论的是适用于汽轮机实际结构特点的启动工况问题，那末，第五部分研究的是“逆命题”，即设计新汽轮机或改进老设计时，启动工况对选择这些或别的结构方案的影响。

本书主要注意力集中在汽轮机部件的不稳定温度状态和热应力状态问题，从此观点出发，研究了启动工况问题。

作者认为，有必要给本书增附足够的参考文献，以便使读者对其感兴趣的问题能找到详细的资料。为此，大部分引文只是指明补充文献的来源，其顺序并不表示具有优先的性质。所以，分析国外经验时，引文尽量不指原文，而用俄文概述，使广大读者更容易理解。由于讨论题目的多样性，为了使用方便起见，参考

文献按每章分别列出。

汽轮机启动工况研究的结果是本书的基础。参加试验的有下列单位：全苏热工研究所（ВТИ），苏联动力技术局（Союз Техэнерго）及其所属单位，中央锅炉透平研究所（ЦКТИ），苏联汽轮机设备制造厂和其它科学研究、施工、设计、结构设计等机构。还采用了国外的研究成果。相当部分的整理资料是以试验数据为基础，直接参加试验的除作者外，还有下列人员，他们是：Г.Д.阿夫尔乌茨基，З.Ф.冈卡连柯，В.Ф.古托罗夫，Ю.Л.依兹拉依列夫，В.Б.基里洛夫，Б.Н.留多米尔斯基，А.Д.美兰美德，И.В.姆拉托娃，Ю.А.拉金（全苏热工研究所），Е.Е.戈凡尔多夫斯基，В.М.克里梅丘格斯基（苏联动力技术局）等。

伯·依·施姆克列尔编写了本书第三章，В.М.克里梅丘格斯基和作者合写第十四章。

作者感谢Н.С.车尔连茨基对本书进行的校订。Я.М.鲁宾施坦教授对本书的编写给予大力支持，提出了许多宝贵的建议和意见。作者对全苏热工研究所汽轮机装置变动工况和汽轮机组实验室，参加试验和整理研究结果的所有同事，以及对本书的准备、编写和出版工作给予帮助的工作人员表示衷心的感谢。对本书的批评和建议请寄下列地址：

113114, Москва, М-114, Шлюзовая Наб., 10, Издательство «Энергия»

作者

目 录

前 言

第一部分 单元发电机组汽轮机的结 构和运行条件简述

第一章 电力系统负荷曲线急剧变化时单元机组的 运行条件	1
第二章 苏制单元机组主要类型汽轮机的结构特点	5
§ 2-1 火电站汽轮机	5
§ 2-2 核电站汽轮机	10
第三章 单元发电机组的启动系统	11
§ 3-1 对启动系统的要求	11
§ 3-2 配有直流锅炉的单元机组启动系统	12
§ 3-3 配有汽包锅炉的单元机组启动系统	17
§ 3-4 核电站单元机组的启动系统	19
第四章 启动工况的一般特性和操作流程	21
§ 4-1 汽轮机状态的主要指标	21
§ 4-2 汽轮机冷却和启动前的温度状态	23
§ 4-3 启动前的准备措施	25
§ 4-4 主要启动操作	29

第二部分 汽轮机部件热应力状态的研究方法

第五章 温度场的研究	37
§ 5-1 研究方法	37
§ 5-2 导热方程	37
§ 5-3 导热方程的解析解	39

§ 5-4	导热方程的数值求解法	42
§ 5-5	汽轮机部件温度场的模拟	46
第六章	按实测汽轮机变动工况数据估算其放热条件	48
第七章	汽轮机启动工况时蒸汽温度变化的估算	55
§ 7-1	汽轮机不稳定工况时进汽温度的变化	55
§ 7-2	汽轮机通流部分的蒸汽温度变化	59
§ 7-3	汽缸汽封蒸汽的温度变化	61
第八章	汽轮机部件温度应力的估算	65
§ 8-1	汽轮机启动时决定应力变化的因素	65
§ 8-2	热弹性的基本关系	67
§ 8-3	简单形状物体的温度应力	68
§ 8-4	热弹性问题的数值解法	75

第三部分 汽轮机启动时主要部件的 热应力状态

第九章	进汽机构	79
§ 9-1	进汽机构的布置和典型结构	79
§ 9-2	进汽机构加热的边界条件	83
§ 9-3	阀门壳体的温度场	87
§ 9-4	阀门壳体温度应力的计算	93
第十章	汽轮机汽缸	97
§ 10-1	高压缸和中压缸的典型结构图	97
§ 10-2	汽缸加热的边界条件	98
§ 10-3	高压缸和中压缸的温度场	101
§ 10-4	启动时高压缸和中压缸加热的计算	108
§ 10-5	启动时高压缸和中压缸的温度应力	110
§ 10-6	启动温度应力造成汽缸的损伤	115
第十一章	汽轮机转子	119
§ 11-1	转子的类型和结构	119
§ 11-2	启动工况时转子加热的边界条件	120
§ 11-3	启动工况时转子的温度状态和应力状态	128
§ 11-4	转子表面的温度应力集中	135

§ 11-5	交变温度应力作用下转子的损伤	143
第十二章	径向间隙和轴向间隙的变化	149
§ 12-1	间隙变化的特点及其研究方法	149
§ 12-2	径向间隙的变化	150
§ 12-3	轴向间隙的变化	156

第四部分 最优启动方式的 选择和实现

第十三章	监控汽轮机暖机和热应力状态的组 织 方 法	164
§ 13-1	监控的目的和方法	164
§ 13-2	汽缸部件温度的监控	167
§ 13-3	转子暖机和热应力状态的监控	171
§ 13-4	通过监控指标为值班人员显示汽轮机状态	175
第十四章	火电站单元机组汽轮机合理启动操作 流程的制订	179
§ 14-1	制订单元汽轮机启动操作流程的某些特点	179
§ 14-2	蒸汽初参数的选择	180
§ 14-3	启动前进汽机构的暖机	182
§ 14-4	向汽轮机送汽和转子升速	185
§ 14-5	汽轮机带负荷	189
§ 14-6	单元机组的停机	194
第十五章	计算最优化启动工 况	197
§ 15-1	最优化问题的准则及其解决途径	197
§ 15-2	火电站汽轮机的最优化启动	203
§ 15-3	核电站汽轮机的最优化启动	206
第十六章	单元发电机组汽轮机启动工况自 动 化	209
§ 16-1	自动化的问题和手段	209
§ 16-2	逻辑控制的自动化	213
§ 16-3	连续控制的自动化	215
§ 16-4	汽轮机的自启动装置	219
第十七章	汽轮机的 启动 试验	225
§ 17-1	启动试验的主要任务	225

§ 17-2	准备启动试验时温度测量的组织	227
§ 17-3	启动试验的内容	231

第五部分 机动性的要求对汽轮机 结构的影响

第十八章	提高机动性的结构措施	234
§ 18-1	提高机动性的主要途径	234
§ 18-2	高温汽缸和阀门汽室的结构	234
§ 18-3	汽缸的加热	240
§ 18-4	提高转子启动热强度的结构措施	241
§ 18-5	单元发电机组带半尖峰负荷的汽轮机	246
§ 18-6	单元发电机组带尖峰负荷的汽轮机	250
附录		253
本书使用的缩写和符号		253
参考文献		255

第一部分 单元发电机组汽轮机 的结构和运行条件简述

第一章 电力系统负荷曲线急剧变化时 单元机组的运行条件

火电站和核电站的大容量单元汽轮机装置，构成了苏联动力工业的基础。单元机组电站的装机容量和发电量的比重不断增长。到第十个五年计划初期，全苏统一电力系统中单元发电机组的装机容量，占火电站总容量的54%，而某些地区电力系统，如南方联合电力系统，单元发电机组的容量比重可达74%。核电站在动力工业中的作用开始日益增长。由于核电站单元机组的单机容量大（目前有44万千瓦、100万千瓦，计划中还有150~200万千瓦的机组），在个别电力系统的组成部分中，核电站的比重可达25~35%[1,2]。

现阶段动力工业发展的另一特点是，日负荷曲线图和周负荷曲线图的不均匀性（负荷跳动）日益加剧（图1-1）。这一点与市政公用事业和日常生活用电以及农业用电负荷的超前增长，与工业生产连续工艺过程用电量的减少有密切关系。表征负荷曲线特性的主要指标是：最大负荷 $P_{\max}$ ，最小负荷 $P_{\min}$ 和平均负荷 p_{cp} ，负荷不均匀率 $\alpha = P_{\min}/P_{\max}$ 及其密度 $\beta = P_{cp}/P_{\max}$ 。目前欧洲地区统一电力系统冬季工作日日负荷曲线的最大变动部分约占30~35%，在个别联合电力系统约占35~43%。冬季工作日早晨负荷每小时最大增长量达最大负荷的7~18%[2,4]。

由于电力系统容量的增长，发电机组容量结构的改变和负荷曲线密集度的降低，解决负荷曲线上的变动部分负荷的任务变得越来越复杂。

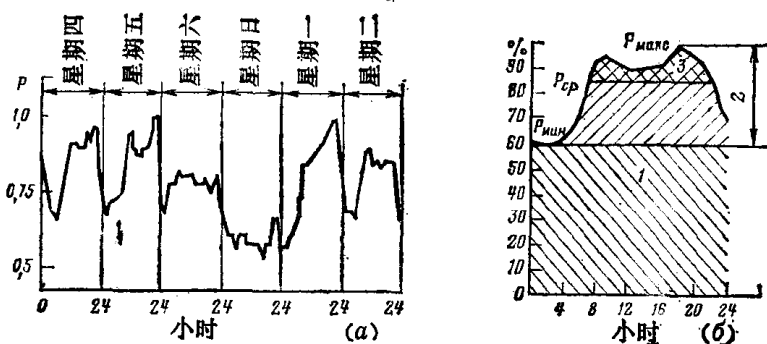


图 1-1 电力系统负荷曲线不均匀性的特点

(a) 典型的周负荷曲线；(b) 日负荷曲线分段特征

1—基本负荷部分；2—变动负荷部分；3—尖峰负荷区

如果以前为了解决负荷曲线的变动部分负荷，主要是利用水电站和经济性较低的汽轮机装置，而剩下的低谷部分负荷，比较容易解决，靠某些降低负荷的其它动力装置，那么在新的条件下，这种办法就不够了，还必须让单元汽轮发电机组参加电力系统调峰。从1972年、1973年起，容量为16万千瓦和20万千瓦的单元机组已开始执行上述工况；西北联合电力系统，从1973~1974年起，超临界压力30万千瓦单元机组频繁地参加该调峰过程[1]。

单元机组参加解决负荷曲线变动部分负荷的途径有：一是将单元机组的负荷降到技术所允许的最低限；二是在低谷期间，单元机组停机备用。单元机组的最小负荷主要是受锅炉可靠性（锅内工况的稳定性、蒸发管路的水动力特性、中间再热器的工作条件等）的限制。苏制锅炉在燃用固体燃料且不用天然气或重油助燃时，技术所允许的最低负荷通常等于70%额定功率（对液态排渣锅炉，此值更高），燃用天然气——重油的单元机组容许在30%额定负荷下长期运行。

充分利用火电站的调节幅度，就必然要更大规模地实行夜间和节日低谷负荷时停机，以及继而启动。第九个五年计划末，和1971年相比，中部、西北部和南方联合电力系统，为解决日负荷

曲线的变动部分负荷，持续停机备用时间小于20小时的次数增多了：容量为16万千瓦单元机组，停机备用次数增加10~11倍；20万千瓦单元机组，增加7~8倍。根据上述三个电力系统的统计，1971~1974年停机备用的总次数见表1-1。在某些个别电站（斯塔罗别什夫斯克Старобешевская，普里德聂伯罗夫斯克Приднепровская，立陶宛斯克Литовская，别廖佐夫斯克Березовская等电站），冬秋季节每天有3~4台单元机组停机备用[2, 5]。

表 1-1 苏联欧洲部分中部、西北部、南方联合电力系统1971~1974年期间单机容量为16万千瓦~30万千瓦单元机组的备用停机次数

单元机组 容量(万千瓦)	年 份			
	1971	1972	1973	1974
30	$\frac{60}{—}$	$\frac{150}{—}$	$\frac{220}{4}$	$\frac{500}{26}$
20	$\frac{430}{80}$	$\frac{500}{165}$	$\frac{610}{315}$	$\frac{880}{620}$
16	$\frac{180}{25}$	$\frac{215}{55}$	$\frac{230}{80}$	$\frac{430}{270}$

注 分子是备用停机的总次数，分母是持续时间小于20小时的停机次数。

苏联欧州部分某些个别联合电力系统，节假日与工作日相比，其最大负荷降低20~30%[6]。在秋、冬季节的节假日，火电站单元发电机组总数的12~25%要停机备用和检修[2]，因此提出要使超临界压力80万千瓦单元机组，甚至还有核电站参加电力系统调峰的问题[4]。

在电力系统负荷曲线急剧变化条件下，掌握单元汽轮机组的启动工况，具有很大的经济意义。众所周知，单元机组减负荷过大时，其技术经济指标将明显恶化。分析表明，电站部分单元机组在非工作日的负荷低谷期停机30~50小时或更长时间，以及某些情况下停机过夜，可能更经济。这时电站的其它单元机组尽可

能维持在最大经济工况运行。国外就是采用这类方法来解决负荷曲线变动部分负荷的问题[6]。

在经常启停条件下工作，设备磨损必然加剧，从而降低其经济性和可靠性。在负荷曲线急剧变化条件下处理单元机组工况问题时，必须重视这一点。为了调节电力系统负荷而必须进行快速启动时，防止降低机组经济性和可靠性就特别困难。

夜间和非工作日用电处于低谷时，为保证电力系统的可靠经济运行，单元发电机组应具备良好的启动特性，以满足电力系统对机组机动性的技术要求。假日停机后启动时，单元机组增加负荷的平均速度，应不小于每分钟 $0.7\sim 0.85\%$ 额定功率，夜间停机后启动时，则不应低于每分钟 $1.2\sim 2\%$ 额定功率[3]。如果这些要求不能满足，就会出现被迫延长低负荷运行时间，从而降低发电的经济性；由于单元机组加负荷滞后于用电量的增长，还会引起出力不足而限制用电等。

除了缩短汽轮发电机组由并网到满负荷的加负荷持续时间，或提高加负荷平均速度之外，缩短准备启动操作的持续时间也很重要。从锅炉喷燃器点火到机组并网的启动时间，晚上停机过夜的机组实际上可减到一小时，停机两昼夜的机组，为两小时。过多延长启动操作时间，会不适当地增大启动损失，尤其是电站中同时启动若干台单元机组时，运行人员的组织工作会遇到困难。

总结以上所述，应该指出，保证单元机组的机动性、可靠性和经济性，根据电力系统负荷曲线急剧变化的态势，选择并制订单元机组的最佳工作条件等，都要求对设备的可能性，限制过渡工况速度的因素，在启动过程扩展这些可能性的结构措施、系统、操作措施和技术组织措施等项有深入的理解。

第二章 苏制单元机组主要类型汽轮机的结构特点

§ 2-1 火 电 站 汽 轮 机

亚临界蒸汽压力为12.75兆帕（130公斤力/厘米²）、容量为16万千瓦和20万千瓦，以及超临界蒸汽压力为23.5兆帕（240公斤力/厘米²）、容量为30万千瓦、50万千瓦、80万千瓦的凝汽式单元发电机组，有列宁格勒金属工厂JM3和哈尔科夫(XTT3)透平工厂制造的汽轮机。单元制热电站由透平发动机厂(TM3)制造厂提供容量为25万千瓦的超临界压力机组。火电站单元发电机组的新蒸汽温度和再热蒸汽温度均为540℃。

现将这些汽轮机的主要结构特点加以说明，因为它们决定着单元机组的机动性和启动工况。参考文献[1-6]刊有上述汽轮机的详细说明。并附有汽轮机纵剖面图和横剖面图。主要结构部件（如阀门壳体、汽缸和转子）所采用的基本方案，在后面相应章节有更详细的叙述，专门论述部件的温度状态和热应力状态。

苏制火电站汽轮机都是单轴设备，转速为3000转/分（只有JM3 K-800-240-1型汽轮机是例外，采用双轴），所有这些汽轮机都采用喷嘴配汽结构。

汽轮机的高温汽缸部件（配汽阀的蒸汽室、高压汽缸、中压汽缸）通常采用15X1M1ΦП号钢制造，哈尔科夫透平工厂制造的功率为30万千瓦和50万千瓦的汽轮机采用15X2M2ΦБC(ΠЗ)号钢，列宁格勒金属工厂制造的30万千瓦汽轮机也采用15X11MΦБ号钢。汽轮机高压和中压的整锻转子，列宁格勒金属工厂用的是P2和P2M号钢。哈尔科夫透平工厂用的是ЭИ—415号钢。

K-160-130型汽轮机是一个高、中压合缸和一个双流低压缸组成的双缸机组。第一台这类汽轮机由哈尔科夫透平工厂于1958年制造，第一台单元机组于1960年已投入运行。

新蒸汽从主汽门经四根导汽管进入调节阀门蒸汽室，头两个调节阀门同时开启，装在汽轮机的两侧，其蒸汽室用法兰与下汽缸相连。另外两个阀门位于上汽缸。蒸汽经每个阀门进入各自的喷嘴室。

汽轮机高压缸头几级的区域，有内层汽缸，围绕内缸外部，有蒸汽流过前端部汽封。中压缸进汽室布置在汽缸中间，用隔离隔板与高压缸排汽室隔开。为了减少隔离隔板两侧的温差（不采取专门措施时，此温差值可达 $180\sim 190^{\circ}\text{C}$ ），用带石棉垫的钢板，把隔离隔板、进汽联管和中压缸进汽区的缸壁屏蔽起来，同时在屏蔽壁与汽缸之间，用高压缸排汽室引来的蒸汽进行冷却。中压缸的排汽进入双流程低压缸。

高、中压合缸的转子均采用挠性整锻转子，低压缸转子采用刚性焊接叶轮结构。转子与转子之间用半挠性联轴器连接，每根转子均有两个径向轴承，轴向推力轴承装在前轴承座内。

K-200-130型汽轮机是列宁格勒金属工厂1958年的产品，第一批装有K-200-130型汽轮机的单元机组，已于1960年投入运行。

汽轮机由高压缸、中压缸和双流程低压缸组成。新蒸汽由两个主汽门经四根导汽管进入调节阀门蒸汽室，蒸汽室和喷嘴室与高压汽缸采用焊接法连接，高压缸没有内层缸。

为了较均匀地加热高压缸的连接法兰，从前汽封到第九级后汽室之间的区段，设有法兰和螺栓加热装置。加热蒸汽来自加热蒸汽联箱，加热外层汽缸并自下而上进入水平中分面，汽源可取自本单元机组的新蒸汽，或外部汽源，例如相邻单元机组的中间再热管道。

K-200-130型汽轮机中压缸也是单流程结构，没有内层汽缸。中压缸的排汽进入双流程低压缸。高压缸和中压缸的进汽布置在中间轴承处，用以减小汽轮机的轴向推力，还可以缩短两个高温汽缸头几级的轴向间隙。

从1971年起，列宁格勒金属工厂改型生产K-210-130-3型汽

轮机，除通流部分的改型提高了汽轮机的额定功率和经济性能之外，K-210-130-3型汽轮机的高压主汽门壳和高压缸在结构上具有如下特点，K-200-130型汽轮机主汽门体为法兰连接，现换成了螺纹连接。在维持高压缸外形连接尺寸不变的条件下，由于外汽缸形状的改进，使汽缸壁厚度和法兰宽度显著减薄。中压缸螺栓第四号至第九号区段类似于高压缸，装有法兰和螺栓加热系统。

从1960年起，列宁格勒金属工厂和哈尔科夫透平工厂开始生产30万千瓦的单元汽轮机组，其结构方案相同：高压缸+中压缸（在此缸还设置有低压缸一个流程）+双流程低压缸。而在汽轮机的结构方面，这两个厂相互间却各有显著特点。

JIM3 K-300-240-型汽轮机调节阀门蒸汽室从高压缸分开，单独布置在其主汽门两侧。新蒸汽由两个主汽门送往七个调节阀门，然后由此送往高压缸的四个喷嘴室。主汽门汽室本体和阀门盖采用螺纹连接，而调节阀门汽室本体和阀门盖则采用法兰连接。

汽轮机高压缸采用双层缸结构，蒸汽由外缸中部引入，经过内缸头六个级后，汽流回转180度，这样就可以用流过两缸夹层空间的全部汽流，保证内缸的冷却和外缸的加热。进汽联管与高压外缸的接头采用焊接连接，而与焊在内缸的喷嘴室通过密封环进行连接，在进汽联管和外缸接头间的空隙，从内外两缸夹层空间引入冷却蒸汽。

中压缸的主汽门和调节阀门成对地组装成两个阀门组，分别安排在中压缸两侧，用法兰和中压下缸连接。中压缸是单流程单缸结构。

高压缸和中压缸的转子均采用整锻转子，为了减小轴向推力，在中压缸前汽封区的转子上装设有平衡活塞。

高压外缸和中压外缸均备有法兰和螺栓加热系统。

XTT3 K-300-240型汽轮机的结构特点之一，是主汽门和调节阀门构成联合阀门组，两个联合阀门组的每个组由一个主汽门