

文章编号:1000-6761(2005)01-0007-06

电站汽轮机研制与生产的可靠性技术研究

史进渊, 杨宇, 邓志成, 张兆鹤

(上海发电设备成套设计研究所, 上海 200240)

摘要: 给出了电站汽轮机的10个可靠性特征量的计算公式或术语以及汽轮机强度与振动的17个设计判据。介绍了电站汽轮机关键部件寿命评定技术研究的新进展和汽轮机关键部件寿命设计技术规程。分析了超临界汽轮机、超超临界汽轮机、空冷汽轮机、燃气轮机联合循环汽轮机和核电汽轮机结构可靠性设计的技术特点。介绍了电站汽轮机研制和生产过程的可靠性通用大纲, 内容包括可靠性工作的5项总要求和18项详细要求。参14

关键词: 动力机械工程; 汽轮机; 可靠性; 寿命设计; 可靠性设计; 结构设计; 设计判据

中图分类号: TK262

文献标识码: A

Research on Reliability Techniques in Steam Turbine Development and Production

SHI Jin-yuan, YANG Yu, DENG Zhi-cheng, ZHANG Zhao-he

(Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: Ten calculation formulas or terms for characteristic quantities of steam turbine reliability in power stations are given, together with design criteria concerning strength and vibration. New developments in research on life assessment techniques for critical components of power plant steam turbines and their life expectancy design codes are also described. Special features of structural reliability design of supercritical steam turbines, ultra-supercritical steam turbines, steam turbines with air-cooled condensers, steam turbines in combined-cycles and steam turbines of nuclear power plants are being analyzed. A general outline of reliability work in steam turbine development and production is itemized, including 5 topics concerning general requirements and 18 detailed ones. Refs 14.

Key words: power and mechanical engineering; steam turbine; reliability; life expectancy design; reliability design; structural design; design criterion

随着国民经济和电力工业的快速发展,大容量发电厂不断增加。国内火电结构优化升级,对高参数、大容量的超临界汽轮机、耗水少的空冷汽轮机和参与调峰的联合循环汽轮机的研制和生产又提出了新的要求。国家适度发展核电,对核电汽轮机的研制和生产也提出了新的要求。可靠性技术是电站汽

轮机研制和生产的共性技术和核心技术,能源的高效利用、节能、节水和环保都以电站设备的可靠性为前提。随着科学技术的发展,汽轮机的可靠性技术的研究又取得了不少新的进展。根据多年的科研成果^[1~9],研究和分析电站汽轮机研制和生产的可靠性共性技术是一项有益的工作。

1 汽轮机的可靠性特征量

产品是企业的命脉,质量是产品的生命,可靠性是质量的灵魂。可靠性是衡量汽轮机质量的重要指

收稿日期:2004-03-15

基金项目:上海市优秀学科带头人计划资助课题(04XD14025)

作者简介:史进渊(1956-),男,教授级高级工程师,从事火电设备可靠性、寿命评定、状态检修和优化运行技术等方面研究。

标,是汽轮机市场竞争的焦点。随着科学技术的发展,汽轮机的可靠性日益引起电力部门的重视。汽轮机的可靠性高低,与火力发电厂安全经济运行紧密相关,事关汽轮机制造业和电力工业的可持续发展。评价电站汽轮机的可靠性主要指标有:可用系数 AF、强迫停运率 FOR、扣除计划停运的可用度 A_p 、启动可靠度 SR、平均计划大修间隔时间 MTTOO、平均计划大修停运时间 MOOD、平均强迫停运时间 MFOD、运行寿命 OL、启动次数 n 等^[9],下面给出这 10 个可靠性评价指标的计算公式或定义。

(1) 可用系数 AF

$$AF = \frac{\text{可用小时}}{\text{统计期间小时}} \times 100\% = \frac{AH}{PH} \times 100\%$$

(2) 强迫停运率 FOR

$$FOR = \frac{\text{强迫停运小时}}{\text{运行小时} + \text{强迫停运小时}} \times 100\% = \frac{FOH}{SH + FOH} \times 100\%$$

(3) 运行系数 SF

$$SF = \frac{\text{运行小时}}{\text{统计期间小时}} \times 100\% = \frac{SH}{PH} \times 100\%$$

(4) 扣除计划停运的可用系数 A_p

$$A_p = \frac{\text{可用小时}}{\text{统计期间小时} - \text{计划停运小时}} \times 100\% = \frac{AH}{PH - POH} \times 100\%$$

(5) 启动可靠度 SR

$$SR = \frac{\text{启动成功次数}}{\text{启动成功次数} + \text{启动失败次数}} \times 100\% = \frac{SST}{SST + UST} \times 100\%$$

(6) 平均计划大修间隔时间 MTTOO

$$MTTOO = \frac{\text{日历持续时间}}{\text{计划大修次数}} = \frac{PH}{OOT}$$

(7) 平均计划大修停运时间 MOOD

$$MOOD = \frac{\text{计划大修停运小时}}{\text{计划大修次数}} = \frac{POH}{OOT}$$

(8) 平均强迫停运时间 MFOD

$$MFOD = \frac{\text{强迫停运小时}}{\text{强迫停运次数}} = \frac{FOH}{FOT}$$

(9) 运行寿命 OL

以第一次并网算起,机组经历的总的日历时间。

(10) 启动次数 n

汽轮发电机组从静态升速到运行状态的过程为启动。汽轮发电机组在使用寿命内启动的总次数为启动次数。

$n = n_c + n_w + n_h + n_r$ 式中: n 为启动次数; n_c 为冷态启动次数; n_w 为温态启动次数; n_h 为热态启动次数; n_r 为极热态启动次数。

在以上 10 个可靠性评价指标中,AF、FOR、SF 和 A_p 是汽轮机可用性的评价指标,SR 和 MTTOO 是汽轮机可靠性的评价指标,OL 和 n 是汽轮机寿命的评价指标,这 10 个指标从不同的方面评价汽轮机广义可靠性的水平,工程上称为汽轮机的可靠性特征量。

2 强度与振动的设计判据

汽轮机部件强度与振动设计是汽轮机广义可靠性设计的基础工作^[1]。汽轮机部件强度与振动常用的设计判据有:

- (1) 常规设计的静强度设计判据;
- (2) 结构静强度有限元分析设计判据;
- (3) 隔板刚度设计判据;
- (4) 低压缸刚度设计判据;
- (5) 汽轮机胀差设计判据;
- (6) 叶片动强度设计判据;
- (7) 整体围带叶片动强度设计判据;
- (8) 长叶片颤振设计判据;
- (9) 第一种调频叶片设计判据;
- (10) 第二种调频叶片设计判据;
- (11) 整圈连接叶片组设计判据;
- (12) 轴系临界转速设计判据;
- (13) 轴系油膜涡动的稳定性设计判据;
- (14) 轴系不平衡响应设计判据;
- (15) 轴系扭振频率设计判据;
- (16) 轴系扭振应力设计判据;
- (17) 气流激振设计判据。

以上汽轮机部件强度与振动设计的 17 个判据,在传统的汽轮机部件结构强度设计的基础上,考虑了多年来汽轮机部件结构有限元分析、长叶片颤振、转子动力学和气流激振的研究成果,使得汽轮机部件的设计所考虑问题更为全面、更符合实际。为了保证汽轮机的安全性和可靠性,在研制和生产汽轮机的设计阶段,必须考虑以上汽轮机部件强度与振动的 17 个设计判据,保证设计合格是生产安全可靠汽轮机的前提。

3 关键部件的寿命设计

产品使用寿命的长短、安全性与可靠性的高低,已经成为衡量一个国家科学技术水平的重要标

志^[10]。寿命问题是影响汽轮机安全运行的重要因素之一,随着汽轮机功率的增大和调峰要求的增加,汽轮机关键部件的寿命设计问题更为突出。在产品的设计阶段,人们希望能掌握汽轮机关键部件的设计寿命并通过定量计算与结构设计来确定和延长汽轮机关键部件的设计寿命,以满足用户对汽轮机关键部件寿命设计定量化的要求。对汽轮机关键部件进行寿命设计是保证汽轮机设计质量的一项重要工作。近几年来,上海发电设备成套设计研究所负责完成了“大型汽轮机部件寿命评定新技术”,研究制定了《大型汽轮机关键部件寿命设计技术规程》^[2~3]。

3.1 寿命评定新技术

(1) 得出了寿命评定载荷随机性和材料特性离散性的试验结果。在电厂现场进行了几十次汽轮机的启动和停机试验,得出了汽轮机载荷随机性和蒸汽参数变化的统计规律。在科研单位和企业过去几十年试验积累的大量汽轮机部件材料寿命数据的基础上,对材料寿命数据的离散性进行了试验与分析研究,得出了汽缸、转子和阀壳常用材料的低周疲劳、蠕变和裂纹扩展的寿命特性曲线。

(2) 掌握了大型汽轮机部件安全寿命评定新技术。在大型汽轮机部件寿命评定技术的研究中,应用了可靠性理论和可靠性技术,考虑了载荷的随机性和材料特性的离散性,建立了大型汽轮机部件低周疲劳安全寿命、蠕变安全寿命和裂纹扩展安全寿命的计算模型,解决了定量确定汽轮机部件寿命评定结果可靠性的关键技术,得出了大型汽轮机部件安全寿命评定的新技术,寿命评定结果更符合实际。

(3) 建立了完整的大型汽轮机部件寿命评定和寿命设计的技术体系。在寿命评定技术的研究方面,采用了非对称循环法计算汽轮机部件的低周疲劳寿命;采用了定量方法计算大型汽轮机部件蠕变应力和蠕变寿命;把原有转子防脆断缺陷评定技术发展成为大型汽轮机部件裂纹扩展寿命的定量评定技术。建立了完整的大型汽轮机部件低周疲劳寿命、蠕变寿命和裂纹扩展寿命评定和设计的技术体系,实现了运行阶段的寿命评定和设计阶段的寿命设计。

(4) 完成了 300MW、125MW、100MW 汽轮机 9 个部件的寿命评定和 325MW、55MW 汽轮机 6 个部件的寿命设计。对每个部件进行了寿命评定的技术研究工作,得出了这 5 个型号汽轮机共 15 个部件原设计的低周疲劳寿命、低周疲劳安全寿命、蠕变寿命、

蠕变安全寿命、裂纹扩展寿命和裂纹扩展安全寿命,以及 300MW、125MW、100MW 汽轮机 9 大部件累积寿命损耗的评定结果和调峰时剩余寿命预测结果以及延寿措施。

3.2 寿命设计技术规程

(1) 《大型汽轮机关键部件寿命设计技术规程》规定了大型汽轮机关键部件(包括转子、汽缸、阀壳、喷嘴室、蒸汽管道等)寿命设计的基本原则,提出了寿命设计的基本步骤,推荐了设计寿命的计算方法^[2]。该规程适用于 100MW 至 1000MW 汽轮机关键部件的寿命设计。

(2) 《大型汽轮机关键部件寿命设计技术规程》包括 8 个方面的内容:①范围;②引用标准;③术语;④寿命设计的目的和基本原则;⑤寿命设计步骤;⑥寿命计算方法;⑦寿命设计结果的评定;⑧延长设计寿命的措施。

4 结构可靠性的设计技术

汽轮机部件的结构可靠性设计涉及的因素比较复杂,与汽轮机的结构特点(冲动式或反动式)、母型机技术来源、材料选用、产品种类等有关。以下简要介绍同产品种类有关的一些结构可靠性设计因素。

(1) 超临界和超超临界汽轮机。产品的共同技术特点是大功率、高参数,主蒸汽压力高于水的临界压力($P_c = 22.129\text{MPa}$)。超临界汽轮机的主蒸汽压力大多为 24.2MPa、主蒸汽和再热蒸汽温度大多为 566℃,现有超超临界汽轮机的主蒸汽压力为 25MPa~31MPa,主蒸汽和再热蒸汽温度为 580℃~610℃^[4~5]。由于超临界和超超临界汽轮机的进汽参数比较高,强度和寿命问题突出。高温部件材料选择的原则是若保持工作温度下材料的持久强度大于 100MPa,这样做可确保已有的汽轮机结构不做大的设计变动。高温部件采用蒸汽冷却技术,既可以提高材料的使用等级,又可以延长高温部件的使用寿命。常用的蒸汽冷却方案有:外来蒸汽冷却、级后蒸汽冷却、汽缸夹层冷却、第 1 级设计成冲动式、第 1 级叶型根部设计成负反动度、特殊结构的叶轮平衡孔、涡流冷却挡热板、遮热罩等^[6]。由于超临界和超超临界汽轮机的主蒸汽参数比较高、主蒸汽密度比较大,其发生汽流激振的可能性也比较大。汽流激振产生原因复杂,良好的结构设计是超临界和超超临界汽轮机防止汽流激振的关键技术。设计中使用汽流激振软件计算分析确保轴系稳定性合格,并采用轴系和汽封等结构设计改进措施是防止汽流激

振的重要技术手段^[7]。

(2) 空冷汽轮机。产品的技术特点是背压高、背压变化范围大、背压变化频繁。空冷汽轮机的设计背压在同一冷却水温(或气温)条件下要远高于湿冷汽轮机;若湿冷汽轮机的设计背压为 4.9 kPa,则在相同环境温度下,空冷汽轮机的设计背压为 10 kPa~21.6 kPa^[11]。湿冷汽轮机的最高背压一般是额定背压的 2 倍,而空冷汽轮机的最高背压可能达到其额定背压的 2~3 倍。空冷汽轮机的背压取决于大气温度,日温差变化加上空冷系统受环境条件(如风向、风速)或风机启停的影响,致使空冷汽轮机背压的变化频繁。由于空冷汽轮机末级运行在背压高、背压变化范围大的恶劣条件下,须设计空冷汽轮机专用末级叶片,其特点是排汽面积较小、叶片短,具有较高负荷,应采用高强度、大刚度,大阻尼、防颤振结构。由于空冷汽轮机背压高、排汽容积流量小,需开发气动性能优良、刚度好的空冷汽轮机专用低压排汽缸。由于空冷汽轮机背压及排汽温度高,背压变化频繁,背压及排汽温度变化范围大,低压缸变形量也比较大,这些因素对轴系稳定性产生不利影响。低压转子采用落地式轴承座结构或低压转子与发电机转子的连接采用半挠性联轴器,有利于改善空冷汽轮机轴系的稳定性。

(3) 燃气轮机联合循环汽轮机。产品的技术特点是快速启动、有补汽、排汽量多。常规电站汽轮机在通流部分抽取蒸汽加热给水,排向凝汽器的流量一般只有主蒸汽流量的 60%~70%^[12~13]。联合循环汽轮机一般不抽取蒸汽加热给水,为了提高联合循环发电效率,工程上一般采用的双压或多压有补汽联合循环汽轮机。在汽轮机中设计补汽口,补汽后排向凝汽器的流量比主蒸汽流量约大 30%。由于补汽口后流量增加,补汽口后的几级隔板应适当加强。排汽流量的增加要求低压缸采用通流能力比较大、叶高比较长的末级叶片,并采用大冷凝面积的凝汽器。为了适应联合循环汽轮机快速启动的要求,工程上采用全周进汽、滑参数调节、高中压双层汽缸、薄壁汽缸、高窄法兰的结构,进汽管和补汽口对称布置。为了满足联合循环汽轮机快速启动的低周疲劳寿命要求,转子高温区采用小直径(冲动式)结构,叶轮与转子过渡处及内缸采用大圆角结构,以降低热应力和应力集中。

(4) 核电汽轮机。产品的技术特点是大功率、低参数、低饱和蒸汽和大容积流量。国外轻水堆(压水堆和沸水堆)与重水堆核电厂汽轮机的主蒸汽皆为

饱和蒸汽,绝大多数汽轮机为饱和蒸汽汽轮机^[14]。核电汽轮机的主蒸汽压力是约为 4 MPa~7 MPa 的饱和蒸汽。当汽轮机的排汽压力相同时,其可用焓降约为 16.7 MPa/538 °C/538 °C 汽轮机的 60%,单位千瓦的进汽量、排汽量和容积流量都比较大,相应的阀门、汽缸、通流部分尺寸都比较大。饱和蒸汽核电汽轮机高压缸的各级以及低压缸大部分级都工作在湿蒸汽区,叶片、隔板、内缸均面临水滴侵蚀问题,叶片有腐蚀疲劳问题,叶轮和转子面临应力腐蚀问题,核电汽轮机结构设计需要采取去湿措施。大功率核电汽轮机级数少,没有中压缸,高压缸和低压缸大多采用双流结构。核电汽轮机与同功率火电汽轮机相比,核电汽轮机外型尺寸庞大、设备重量大、钢材消耗量多、制造和运输比较困难。轴系多数采用落地式轴承座结构,须开展轴系与基础联合振动特性的优化设计。核电汽轮机排汽容积流量大,工程上采用多排汽口(多个低压缸)结构,凝汽器也因排汽量大而使其换热面积增大,与同功率火电机组相比,循环水量几乎增加一倍。核电汽轮机增加末级叶高,可增加末级排汽面积,可增加汽轮机通流能力,可增大汽轮机功率。采用半速汽轮机,可增大排汽口的通流能力,可增加通流部分各级叶片的叶高,可采用 1500 mm 长叶片,可增大汽轮机功率。与同功率全速核电汽轮机相比,半速机组可采用更长的通流部分叶片和末级叶片,在相同重量流量下可降低排汽速度,可减小余速损失,可降低排汽压力,有利于改善汽轮机的相对内效率,但是实际应用中由于部件尺寸大而受到加工和运输条件的限制。

5 主机的可靠性设计

在现有的电站汽轮机的设计中,可以确定汽轮机的相对内效率、汽耗和热耗等经济性指标,但还不能确定汽轮机的可用系数 AF、强迫停运率 FOR 等可靠性指标^[8]。上海发电设备成套设计研究所经过多年科技攻关,开发出亚临界汽轮机和超临界汽轮机可靠性设计技术及软件系统。使用该设计技术和软件,可以在设计阶段定量确定电站汽轮机设计的可用系数 AF 和强迫停运率 FOR。

(1) 汽轮机本体设计的可靠性评定。根据汽轮机热力设计、结构设计和系统设计的结果,从材料设计、强度设计、寿命设计、振动设计、结构设计等几个方面,采用专家评分法评定汽轮机本体设计的可靠性。

(2) 主机故障的改进情况分析。根据国产和进

口汽轮机运行历史数据的统计分析,可以确定汽轮机在运行中发生的各种引起机组强迫停运和非计划停运的故障模式。国内外同类汽轮机发生的问题,为汽轮机设计者提供了可靠性改进方向,在设计中应采取措施加以预防;在研制和生产阶段采取措施对故障模式及故障原因进行分析并加以改进,是提高电站汽轮机可靠性的有效途径。针对汽轮机故障的改进情况,可以预测汽轮机的设计可靠性水平。

(3) 汽轮机主机的可靠性计算。根据主机与汽轮机本体、自动控制子系统、供油及润滑油子系统、热工监视与保护子系统、本体辅助子系统的可靠性逻辑关系,可以建立汽轮机主机可靠性设计的数学模型。按此模型开发专用软件,可以在设计阶段确定投产第一年,只有节日检修年份、只有小修年份、只有中修年份和只有大修年份等 5 种情况下汽轮机设计的可用系数 AF 和强迫停运率 FOR ,为在汽轮机研制和生产过程中的设计阶段定量确定和改进汽轮机的可靠性提供了科学的依据。

6 研制与生产的可靠性大纲

研究并制定可靠性大纲的最终目标是为了提高电站设备的可靠性,改善产品维修性,提高产品可用性,延长产品使用寿命,保证产品安全性,改善产品灵活性,为电力企业提供性能优良、安全可靠的电站设备。上海发电设备成套设计研究所利用多年从事可靠性研究的成果和所积累的经验,研究制定了《电站设备研制与生产的可靠性大纲》^[9]。该大纲规定了电站设备研制与生产阶段可靠性监督与控制、设计与评价、试验等方面的通用要求和工作项目,该大纲适用于电站汽轮机的研制和生产。

该大纲给出了主题内容、适用范围、引用标准、56 条可靠性专业术语、可靠性总要求、可靠性详细要求和附录。产品 5 项可靠性总要求的内容包括:产品可靠性大纲的目标、对产品可靠性大纲的要求、对可靠性信息的要求、可靠性定量要求、可靠性定性要求。产品可靠性详细要求的内容包括:产品可靠性大纲的监督与控制、产品可靠性的设计与评价以及产品研制与生产的可靠性试验。附录内容包括:电站设备可靠性的工作项目、电站设备的可靠性特征量、电站设备可靠性指标的参考值。

6.1 产品可靠性大纲的监督与控制

(1) 可靠性工作计划(工作项目 101)。要求制造企业制定可靠性工作计划,以实现产品可靠性大纲所规定的全部任务。

(2) 对供方的监督与控制(工作项目 102)。要求对分承包方和供应方的可靠性工作执行情况进行监督与控制,以便采取相应的措施

(3) 可靠性大纲评审(工作项目 103)。要求制造企业按计划安排可靠性大纲的评审,以确保可靠性工作按预定程序进行,并保证产品达到可靠性定量要求。

(4) 建立故障报告、分析和纠正措施系统(工作项目 104)。要求建立一个故障报告闭环系统,确定故障的报告、分析和纠正程序,记录和保存在全部活动过程中形成的文件。

(5) 故障审查及组织(工作项目 105)。要求以一定的组织形式来审查重大故障、故障趋势,以及在产品的研制、生产阶段及时采取有效的纠正措施的情况,并将其记录。

6.2 产品可靠性的设计与评价

(1) 建立可靠性模型(工作项目 201)。要求建立系统、主机或设备、子系统或部套的可靠性模型,用于定量分配、计算和评价产品的可靠性。

(2) 可靠性分配(工作项目 202)。为了将可靠性的定量要求分配到规定的产品层次。

(3) 可靠性预计(工作项目 203)。按照可靠性模型估算系统、主机或设备、子系统或部套的可靠性指标值是否能达到要求。

(4) 故障模式、影响及危害度分析(工作项目 204)。系统地分析零件、元器件、部套、设备所有可能的故障模式,故障原因及后果,以便发现设计中潜在的薄弱环节。

(5) 潜在电路分析(工作项目 205)。假定所有组件均正常工作的情况下,分析哪些能引起功能异常或抑制正常功能的潜在通路。

(6) 电子元器件和电路的容差分析(工作项目 206)。为了研究电子元器件和电路在规定的使用温度范围内,电参数容差的影响。

(7) 制定元器件大纲(工作项目 207)。为了控制标准元器件和非标准元器件的选择和使用。

(8) 确定可靠性关键件和重要件(工作项目 208)。为了确定和控制那些由于复杂性、采用先进技术、潜在故障对系统安全性、可用性以及维修产生重大影响或费用昂贵的产品。

(9) 确定功能测试、包装、贮存、装卸、运输及检修对可靠性的影响(工作项目 209)。为了确定功能测试、包装、贮存、装卸、运输、检修对产品可靠性的影响。

6.3 产品研制与生产的可靠性试验

(1) 可靠性筛选试验(工作项目 301)。为了建立和实施可靠性筛选程序,以便发现和排除不良管材、不良零件、元器件、工艺缺陷和其它原因所造成的早期失效。

(2) 可靠性验证试验(工作项目 302)。为了验证产品或零部件的可靠性参数不随生产期间工艺、工装、工作流程、零部件质量变化而降低,或验证新结构设计的与可靠性有关的参数符合要求。

(3) 可靠性测定试验(工作项目 303)。为了验证产品的设计是否达到了规定的可靠性要求。

(4) 可靠性增长试验(工作项目 304)。为了在研制和生产阶段,通过试验室试验和现场使用发现产品存在的问题,采取有效的纠正措施,及早解决大多数可靠性问题,提高产品的可靠性。

7 结 论

(1) 本文提出的电站汽轮机研制和生产阶段的可靠性设计技术和可靠性共性技术,在传统的强度设计的基础上,考虑了可靠性分析、转子动力学、寿命设计、可靠性设计和可靠性增长的最新研究成果,建立了研制和生产阶段提高电站汽轮机可靠性的技术体系。

(2) 使用文中给出的电站汽轮机的可靠性设计技术和可靠性共性技术,可以在设计和研制阶段定量计算汽轮机设计的可用系数、强迫停运率和寿命,也可以在生产阶段改进和保证汽轮机的可靠性,为在设计、研制与生产阶段提高和改进电站汽轮机的可靠性提供了科学的依据。

参考文献:

[1] 史进渊,杨宇,孙庆,杨光海.亚临界和超临界汽

轮机强度振动与寿命设计判据的研究[R].上海发电设备成套设计研究所,2004.

[2] 史进渊,杨宇,孙庆,邓志成,胡先约.大型汽轮机关键部件寿命设计技术规程[R].上海发电设备成套设计研究所,2003.

[3] 史进渊,胡先约.汽轮机强度研究某些新发展概述[J].上海汽轮机,2002(1):1~6.

[4] 史进渊,施圣康,严宏强.电站汽轮机功率和参数的新发展[J].动力工程,2001,21(3):1185~1188.

[5] 史进渊,杨宇,孙庆,崔奇,张兆鹤.超超临界汽轮机技术研究的新进展[J].动力工程,2003,23(2):2252~2257.

[6] 史进渊,杨宇,孙庆,邓志成,林振坤.超超临界汽轮机部件冷却技术的研究[J].动力工程,2003,23(6):2735~2739.

[7] 史进渊,孙庆,危奇,钟小萍,龚汉声.超超临界汽轮机气流激振的研究[J].动力工程,2003,23(5):2620~2623.

[8] 史进渊.汽轮机零件和系统的可靠性设计[J].中国电机工程学报,1996,16(1):50~53.

[9] 史进渊,杨宇,邓志成,孙庆,林振坤.电站设备研制与生产的可靠性通用大纲[R].上海发电设备成套设计研究所,2004.

[10] 高镇同,阎楚良.结构全寿命主动可靠性设计与失效智能在线预示[J].中国机械工程,2002,11(1):53~55.

[11] 魏松涛.出口伊朗4台325MW空冷汽轮机的设计特点与试运行[J].东方电气评论,2002,16(3):167~173.

[12] 焦树建.燃气-蒸汽联合循环[M].北京:机械工业出版社,2000.

[13] 朱宝田,徐越.整体煤气化联合循环(IGCC)汽轮机的特点[J].上海汽轮机,2002(1):7~14.

[14] 蔡颐年.蒸汽轮机[M].西安:西安交通大学出版社,1988.

下期待发表论文摘要预报

火电机组高压给水加热器动态过程的数值分析

张欣刚¹, 徐治皋¹, 李勇², 胥建群¹

(1. 东南大学, 南京 210096; 2. 东北电力学院, 吉林 132012)

摘 要:通过对高压给水加热器的动态数值仿真计算,分析了高压给水加热器泄漏和汽轮机负荷增大对高压给水加热器的特征参数,如给水出口温度、抽汽管道压损、疏水温度和疏水水位的影响,以及在疏水水位相同时、不同运行状态下的高压给水加热器各特征参数的差异;分析了高压给水加热器泄漏和汽轮机负荷增大对高压加热器给水管热应力的影响。结果表明:单纯凭借疏水水位的升高不能判定高压给水加热器是否发生泄漏,需要根据其他特征参数的变化来判断引起疏水水位的升高是否是由泄漏引起的。