

热力系统可靠性分析的问题与对策

蔡琦, 陈文振, 孙丰瑞

(海军工程大学核能科学与工程系, 湖北武汉 430033)

摘要:以热力系统为研究对象,从概念、方法和工程背景角度探讨其可靠性分析的问题,并就解决所提出的问题表述了作者的观点。

关键词:热力系统; 动态特性; 可靠性分析; 对策

中图分类号: TM621.4 文献标识码: B

1 热力系统可靠性分析的特点

热力系统是由若干热交换器、动力机械、压力容器、连接管路和其它辅助机械组成,并用于实现能量转换、热量传递,或完成某些特殊反应过程的系统^[1],在船舶动力装置中有着广泛的应用。随着科学技术的发展,以蒸汽发生系统为代表的热力系统日趋复杂化和高参数化,加之对热力过程控制的自动化要求,热力系统的可靠性研究得到日益重视。

复杂热力系统的特点是多状态、多参数、多重控制,与电子—电气系统、机械系统相比,可靠性分析有其特殊性。

1.1 系统的整体性

热力系统运行时往往涉及到众多功能系统,包含着各种复杂的物理化学过程(机械运动、热学现象、质能迁移、化学或核反应)和非线性效应,工作原理与功能多种多样、状态各异,提供所需功能的前沿系统与相应的支持系统通过不同的方式组合以满足任务要求。系统结构中各层次故障组合和传递的功能逻辑关系非常复杂,而且使用方法及工况也是随机变化的,这些因素使系统的可靠性逻辑关系难以明确。因为随机特性一般只涉及单个部分的特性,系统的整体特性主要取决于系统的可靠性逻辑关系,因此,“剖面”研究构成热力系统可靠性分析的必要前提。

1.2 系统的关联性

从连接关系上看,系统中设备级以上层次通常具有多种功用,某一设备在为该系统服务的同时是另一系统的备用,某一系统功能丧失可能引起其它

功能丧失;系统中各种过程相互制约、影响或反馈,系统功能通过工质流动实现,而设备状态又通过工质的连接影响系统功能。工质的状态由物理规律所主导,参数存在关联性(典型的如:流通面积减少会使流速提高,局部温度不均匀引起各通道流量再分配)。热力系统的相关结构决定其组成单元的故障非独立,系统动态过程的演变和运行事件的发展存在一定的时间顺序关系。这种关系必须通过时序关系逻辑模型描述,以保证所构造的模型能反映状态的转移过程。

1.3 系统的综合性

在热力系统的设计与配置方面,一是存在多重控制与多重保护;二是系统各组成部分普遍存在功能冗余或备份,其功能量度或运行参数在一定范围内变化,以适应不同工况、环境条件的需要,因此也就允许系统各部分特性的随机变化,进而体现系统综合性能;另外还存在着诸多影响系统综合性能的因素,如:降额状态和因设备老化等原因引起的部分失效,由于人工干预而可能出现的相关功能的各种中间状态,相同逻辑关系下不同的临时事件组合、系统使用中所允许的不同程度的修复。因此,热力系统是一种典型的多状态系统,这就决定了传统的可靠性分析方法(基本上是基于二元逻辑的)的适应性受到限制。

1.4 系统故障的评判^[2]

识别系统故障是系统可靠性分析的一个主要环节。热力系统运行中,由于系统物理、热工水力的固有特性以及反馈因素,参数型故障对系统逻辑关系影响明显,因此参数可靠性是分析的重点。

(1) 系统结构、运行工况的复杂性和关联性,导致故障判据的不定性问题。

(2) 热力系统参数监测上的特点,导致了故障判据的转换问题。

首先,空间效应—大部分参数(物理化学的反应参数,温度、压力、流量等热工参数)具有明显的分布

参数特点,有限的监测仅表征其中若干特定特点。

其次,时间效应—某些参数的测量因机理或位置影响而存在时间延后(如温度、流量的变动传递、反应速率等),仪表读数并不反映系统当前状态。

再次,当量效应—如承压面的破损率或介质的泄漏率往往是用当量描述的,保护定值(来自对平均状态的测量)与系统热点状态的对应等,鉴于效应的复杂性,这类参数的测量其实是一种模拟。

(3)对于这种非单调关联系统,其事件发生概率与故障概率并不等同,而是存在复杂的函数关系。这就导致故障判据的组合问题。

由此可见,完整的热力系统故障判据是多层次的、组合的、与剖面相对应的,并根据故障后果应将判据相应分为安全性、任务性和经济性层次;其数学表达是一个向量,可由系统特性参数的输出产生。

2 与动态可靠性分析相关的方法

对于复杂的研究对象,其可靠性分析首先需要解决模型化问题。模型化方法取决于研究对象具体的原理和结构,一般需满足下列概括性的准则:

(1)以预计复杂系统的不可用度为基本目的,其过程与结果是可交流和应用的,能得到各种实际工作人员的共识。

(2)有规范化的建模方式,且方式是遵循的、可重复的和可验证的;通过对特定问题的处理能总结出具有普适性的技术,以便广泛地应用于多种类型的对象。

(3)能基于整个系统解决多种机理、模式综合作用的问题;能提供合理的完整性保证。

(4)相应地产生一个模型,提供了解对象故障的主要途径,或者防止发生故障或使其影响减小的途径;随着模型数据的积累,可运用相应的数学方法估算复杂对象的可靠性参数。

尽管目前还没有一种技术能完全满足上述准则,但一般认为故障树是了解一个系统是如何工作和如何产生故障的最佳分析工具之一^[3]。

从实现系统可靠性的逻辑关系看,故障树方法对事件的描述是二元的和静态的,通常认为系统中各组成部分的状态相互独立,所考虑的事件发生有共同的时间起点,可以用结构函数作为数学模型进行定性和定量分析,即其逻辑关系是基于组合关系模型。在事件统计独立的假定下,结合可靠性框图分析(RBDA)、故障模式及效应分析(FMEA)等方法,

故障树分析(FTA)能够用于热力系统静态的可靠性分析。常见的热力系统可靠性研究便是如此进行,并针对特定问题,如非单调关联、多状态、故障相依等进行相应的推广或修正。

对于热力系统的动态问题,考虑随时间变化的因素,则事件发生不独立,存在系统状态的变化过程与顺序关系,其逻辑关系是基于时序关系模型的,模型化过程应融合系统可靠性的动态结构信息。因为故障树仅能反映系统的瞬时关系,模型与运行流程无关,无法满足热力系统动态的可靠性研究需要。

相应的模型化技术仍在不断发展之中,其研究途径主要有以下几点。

2.1 Markov 方法

评价随时间演变的系统可靠性或可用性,诸如故障树的方法因缺乏事件发生之间的逻辑关系信息而不可应用,必须使用随机过程,尤其是 Markov 过程^[4]。常用的有 Markov 过程、更新 Markov 过程、Semi-Markov 过程等模型,但实践中主要用于解决简单系统的问题,描述大型复杂系统时因系统状态数量增长导致规模问题而受到限制。

为了减小问题的规模,一种方法是简化状态图,如状态合并、状态图截断等;另一种是分解—整合方法,根据状态转换和事件发生率的差异,断开慢转移中各子系统或设备间的状态关联,归结各快转移子图后再整合到慢转移子图中。但规模问题仍然存在,一是通过上述方法减少求解工作量,二是借助计算机进行处理。

通过状态转移图产生事件序列可实现复杂系统的可靠性分析,关键是改变系统模型化的描述方式。如 S. ESCAF 方法^[5],是一种硬件模拟方法,由数字电路硬件模块表征部件可靠性模型,用信号发生器产生事件信号,加到系统的硬件模型上模拟以识别故障序列。由于方法是针对特定系统进行的,其适应面受到限制。基于类似思路提出的 CRM(Component Reliability Model)方法,提供了一种在 PC 机上实现的、具有低复杂度的系统可靠性描述方法。

求解问题的另一方面,是通过改进故障树方法以适应时序关系模型的可靠性问题。如用平均时间故障树方法(Time-averaged fault tree models)逼近较严格的与时间相关的 Markov 方法,以求得核动力装置辅助系统初因事件概率^[6]。

2.2 GO 方法

应用 GO 方法解决热力系统可靠性的逻辑关系

问题是比较成功的^[3]。这是一种成功—导向的系统分析技术,使用归纳法逻辑来建立系统性能模型,模型与正常工艺流程一致,单元与系统部件相对应,能反映大多数的和系统之间的相互作用及相依关系、描述系统运行方面的情况,从成功与故障两个方面确定系统响应模式,通过计算机程序定量分析系统性能,估计系统可靠性和可用度,找出故障序列和把部件按相对重要度大小排序,有处理多种系统状态的能力,成为唯一能够用于考试系统处于多种可利用度时的分析方法。但对于大型复杂热力系统的模型化,GO方法因为过份复杂以至于无法适用。

2.3 EAT—FTA方法

ETA(事件树分析)是描述大型系统层次故障序列的最适宜方法,可以融合系统的动态结构信息;而FTA尽管有上述的不足,但用于特定系统状态的评价、故障事件组合的识别是普遍公认的良好方法。两者结合就建立一个能够分析处理有关模拟潜在的复杂故障序列的系统模型。

伴随着概率安全评价技术(PSA)的发展,识别故障序列及建立系统模型的统一的方法论已经发展起来,并应用于核电站一级的风险评价,所包含的概率方法进行系统可靠性分析的技术,已成为鉴定安全性能、选择和评价改善安全措施的有效工具,其中利用小的事件树和大的故障树分析是一种倾向^[3,7]。这些技术从原理上也适用于热力系统。

3 基本对策的探讨

由于热力系统运行机理和结构的复杂性,相应的数据基础过于薄弱,传统的系统可靠性分析方法的适用性或有效性受到限制。热力系统是设计特异、时间特异,可靠性分析不可能有普适的方法。解决问题的基本对策包括:

3.1 采用机理和逻辑两种模型描述热力系统

完整地描述热力系统的可靠性特性,包括了系统组成部分的随机特性和系统逻辑关系,把二者分开考虑,则可以同时采用机理和逻辑两种模型。其中机理模型研究故障演变和后果,逻辑模型搜索导致系统故障的事件组合、并确定组合事件的发生频度。从本质上,由于热力系统的特性,其可靠性分析是对一个特定的设计进行的,因此采用机理模型解决系统的设计特导问题,而通过逻辑模型解决系统的时间特异问题。

3.2 建立模拟平台,描述系统运行中的随机特性

热力系统的特点(如大型化、长寿命、潜在风险等)导致了其可靠性研究活动存在间接性,系统模拟是有效的途径。在核电站这类典型的大型复杂热力系统中,近年来结合动态概率风险评价(DPSA),诸多研究是基于计算机仿真结果实现事件序列的分析与识别^[8~10]。

采用系统模拟描述运行机理,能够表征上述部分热力系统可靠性分析特点:

(1)从原则上说,对复杂的热力系统,其结构功用及控制系统甚至可以接近于生物系统,其瞬态事件包含了非常复杂的相互作用,系统参数的变化涉及到系统所有相关部分;另外,系统的响应序列也反映了由控制或安全系统(即自动或人工干预)动作过程起始点与终结点所引起的离散事件的影响。在这种度高交互的环境中,一个综合的故障分析必须包括有系统动力学、操纵员行为和安全系统的特性,相应的模型化方法必须是建立在模拟基础上。

(2)热力系统从本质上讲是非线性的^[1,11],描述系统特性的介质守恒方程、流体热力学状态方程、传热方程等均是非线性,不同初始工况下系统特性各异、不符合叠加原理;热力设备的性能退化也是非线性的。在研究系统的稳定性时,小偏差线性化方法是十分有用的,但可靠性研究更关注系统运行中在各种瞬态下保持和恢复功能的能力,包括系统大扰动下的过渡过程、故障下的控制对策等,因而系统模型应综合考虑全工况、非稳定工况、非线性等影响。

(3)系统相关性会使多重的,同时出现的故障频率有增加的趋势,因此相关故障分析是复杂系统可靠性分析的难点。将相关故障分为结构诱发的与参数诱发的,则前者可在逻辑模型中处理,后者由机理模型解决(反映性能参数与功能要求之间的关系)。

(4)其它的,能有效地考虑系统对下列影响因素的响应特性与状态变化:

- 组成部分的故障率变化(包括降额、设备老化、部件部分故障等);
- 外部事件(诸如丧失电力、水淹、火灾、地震等);
- 仪表故障(典型的研究中常是不涉及的,但它对系统的控制是重要的);
- 维修贡献(热力系统的很多故障在运行中是可能被修复的);
- 运行经验反馈(系统投入运行后,可靠性数据基

础将加强,系统、设备得到改进,管理水平逐步提高)。

常规的研究中,上述效应是分别考虑或部分考虑后加到逻辑模型上的。而系统模拟可以综合的修正这些效应对可靠性分析结果的影响,从参数可靠性的角度解决系统故障评判问题。

基本对策是建立一个模拟平台,以系统机理模型为主干,用于当系统特征和性能结合到相关的逻辑模块时,进行系统故障工况的模拟。模拟平台的运转,是通过复杂过程的精确模拟、先进的计算方法、以及在精度与计算资源之间的权衡优化来实现的。

3.3 构造逻辑模型,演绎潜在的系统演变过程

被分析的系统基本上是在两个等级上定义的。第一级定义是功能级,即系统必须能成功地对故障工况或瞬态过程作出响应而完成的功能;第二级定义是实体上的,确定了该系统功能所需要的硬件,描述了系统可运行性的最小可接受状态即成功准则。

构造逻辑模型的基本出发点是寻找潜在的系统故障序列,首先是限定初因事件,每一次分析均是针对特定初因事件进行的。根据事件序列中涉及的各项系统功能的设计特点,按初因事件的相似性进行分组,对具有类似响应过程与动作特征的一组初因事件建立事件树,以把事件树的数目降低到一个可以操作的水平。

系统的故障序列由离散动态事件树(D-DET)表示。依据剖面,考虑其动态特征,通过模拟平台模拟系统的演变过程,由事件发生的离散点选择分叉点,所有正常功能系统在任意时间离散点分叉按故障判据或成功准则确定系统状态的转移,以及相应的时间历程,形成成功或失败两路来完成系统功能的传递与综合。

上述过程既是:应用事件树作为求出初因事件和系统响应之间复杂关系的中间分析步骤;通过事件序列分析明确系统的响应;应用序列截断和终结规则以产生故障情景。为了正确理解和协调那些能影响潜在故障过程的许多因素,事件树描述了一个给定的故障时间上的、功能上的和硬件上的相互关系,给出考虑时序及协调相互作用的方法。

事件树表征了系统成功与失败的所有可能路径,对其过程事件(功能丧失)的支持逻辑是故障树。功能丧失是由故障、反向干预、极端事件等引起,建立相应的故障树用于演示导致功能丧失的各种原因组合。故障树按功能—系统—部件逐级分解而追溯到基本故障事件,以故障树的特定逻辑组合就能定性确定出最小割集,相应地可产生故障模式重要

度和部件重要度;若由运行经验获得基本事件概率,则能量化特定事件的系统故障概率。

3.4 评价系统可靠性

上述步骤完成了故障条件下热力系统物理、热工水力过程、控制行为三方面的依赖于时间的事件序列模型化,从中可以确定对系统功能丧失起主导作用的故障序列;恰当地运用逻辑推理和工程背景知识进行筛选,能够保证对序列数量的控制。由此,获得了支持系统可靠评价的下列信息:

- 系统的功能状态以及相应的硬件状态;
- 决定系统功能状态和输出量的控制动作判据及响应时间;
- 表征系统运行所需的支持系统等边界条件;
- 恢复不可用系统、设备或仪表的修复时间;
- 可用、不可用度和运行期间故障率表示系统特性的概率。

上述工作,即便限于运行数据积累而无法定量计算系统可靠性参量,也能获得对系统潜在的故障发生原因、演变过程和后果影响等方面的认识,为系统的改进、运行规程的修订、故障干预方案的研究提供依据。

参考文献:

- [1] 王广军,辛国华. 热力系统动力学及其应用[M],北京:科学出版社,1997.
- [2] 蔡琦,孙丰瑞. 热力系统可靠性分析中建模方法与技术探讨[J],湖北、湖南工程热物理学会98年学术会议论文[C],1998.
- [3] PRA procedures guide[R]. NUREG/CR-2300, USNRC, Washington, DC, 1983.
- [4] BLIN. Use of Markov processes for reliability problem[R]. Synthesis and Analysis Methods for Safety and Reliability Studies Plenum Press, NY, 1980.
- [5] 陈苏. 系统可靠性分析的CRM模型研究[D],北京:清华大学,1991.
- [6] XING L, FLEMING K N, LOH W T. Comparison of Markov model and fault tree approach in determining initiating event frequency for system with two train configurations[J], **Reliability Engineering and System Safety**, 1996, 53: 17~29.
- [7] UMAMOTO H K, HENLEY E J. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists[R]. IEEE PRESS, 1996.
- [8] HSUEH K S, MOSLEH A. The development and application of the accident dynamic simulator for dynamic probabilistic risk assessments of nuclear power plants[J], **Reliability Engineering and System Safety**, 1996, 52: 297~314.
- [9] DEVOOGHT J, SMIDIS C. Probabilistic dynamics as a tool for dynamic PSA[J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 1996, 52: 185~196.

复合燃烧技术在链条炉上的应用

王彦, 曲广义, 雷桦

(哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

关键词: 复合燃烧; 机理; 燃烧过程; 技术特性

中图分类号: TK16 文献标识码: B

1 前言

链条炉排虽然是一种较好的燃烧设备, 但在使用中存在一定缺点, 当煤种多变、煤质不好时, 实际出力不足, 热效率偏低。如何改善链条炉运行工况, 提高燃烧效率及煤种适应性, 一直被科研人员所关注。链条炉加煤粉复合燃烧技术主要是为强化炉内燃烧过程、提高锅炉燃烧效率及煤种适应性而设计的。该技术应用从根本上解决链条炉在不同煤质条件下着火和燃烧问题, 为链条炉挖潜改造、提高出力、提高热效率和节约能源提供了一条新的途径。

2 复合燃烧的机理

从锅炉燃烧理论可知, 保持炉膛足够高的温度是保证锅炉良好燃烧的首要条件。炉温高, 煤在炉内可干燥干馏达到着火温度的时间短、着火容易。煤种的适应性也就越好。

现有的燃煤锅炉的燃烧方式中, 煤粉炉的炉温较高, 煤种的适应性比较好, 特别是燃用劣质煤的能力较强。在复合燃烧中, 煤粉随空气进入炉内悬浮燃烧。由于煤粉很细, 与空气接触面积大大增加, 在很短的时间内能获得较高的炉膛温度。大多数煤都能在复合燃烧中有效燃烧。

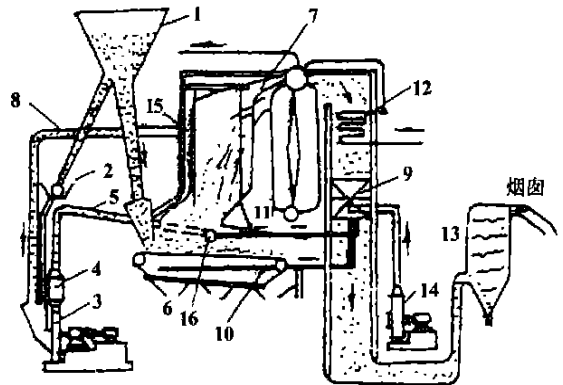
链条炉加煤粉复合燃烧方式的机理是将链条炉排和煤粉这两种不同的燃烧方式有机结合, 共用在一台炉上, 并进行互补。在燃烧过程中, 煤粉燃烧形成的高温火焰提高了炉膛温度, 为链条炉排上的煤层着

火提供了丰富的热源, 改变了过去链条炉单纯依靠炉拱热辐射引燃的状况, 改善了链条炉排上新煤着火条件, 煤能够顺利燃烧。同时, 稳定燃烧的火床又是煤粉气流着火的可靠热源, 可以保证煤粉及时稳定地着火, 在多变的负荷下保证煤粉气流稳定的着火燃烧, 保证煤粉悬浮燃烧具有较好的安全可靠性能。

由此可见, 这种复合燃烧方式不仅保留了链条炉排负荷适应性好、负荷调节方便的优点, 而且还具有煤粉炉煤种适应性好、燃烧效率高的优点。

3 系统流程

整个锅炉燃烧过程分为炉排燃烧过程和煤粉燃烧过程, 见图1。



1—煤斗; 2—给煤机; 3—风扇磨煤机; 4—粗粉分离器; 5—煤粉管道; 6—燃烧器; 7—锅炉; 8—抽烟管; 9—空气预热器; 10—炉排送风管; 11—燃烧器送风管道; 12—经济器; 13—除尘器; 14—鼓风机; 15—抽烟口; 16—旋流燃烧器

图1 链条锅炉加煤粉复合燃烧系统流程图

煤粉通过煤粉管道进入燃烧器, 燃烧器一般采用

收稿日期: 2001-03-06; 修订日期: 2001-08-06

作者简介: 王彦(1965-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨锅炉厂有限责任公司助理工程师。

[10] Ni T, MO DA RRES M. Consideration of partial failures in probabilistic risk studies [R], NUIHOS-5, 1997.

[11] 倪维斗. 热动力系统建模与控制的若干问题[M], 北京: 科学出版社, 1996. (择 编辑)

The use in recent years of an axial type separator of coarse pulverized coal at some Chinese cogeneration power plants is described along with a brief account of its upgrading and some problems encountered during its use. Also discussed are the design features of a novel and high-efficiency axial separator of coarse pulverized coal as well as the results of its practical use. **Key words:** separator, upgrading, efficiency, thermal power plant

热力机组停用保护方法 = **Methods for the Protection of a Thermodynamic Plant After Its being Taken out of Service** [刊, 汉] / CHEN Xiao-hua (Changhai Power Plant of Guangdong Naihui Longguang Group Co., Naihui, Guangdong Province, China, Post Code: 528212) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—664 ~ 665

A broad overview is given of the new advances in the methods currently used for the protection of thermodynamic plants after their being taken out of service. Highlighted are the general principles, scope of applications, main points and some issues worthy of close attention. **Key words:** thermodynamic plant, corrosion during out-of-service period, protection during out-of-service period

670 t/h 锅炉制粉系统单耗剧增的原因及技改措施 = **The Cause of a Dramatic Increase in Unit Consumption of Energy of the Pulverized Coal Preparation System of a 670 t/h Boiler** [刊, 汉] / YU Yun-zhong, WANG Ji-cheng (Shuangyashan No. 1 Power Generation Co. Ltd., Shuangyashan, Heilongjiang Province, China, Post Code: 155136) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—666 ~ 668

During the low load operation of a 670 t/h Soviet-made boiler there emerged a dramatic reduction in coal mill drying capacity, which led to a drastic increase in unit consumption of energy. To cope with the problem, proper measures were put forward, which consist in opening the air damper of a primary air pipe (not fed with pulverized coal), which pertains to one of the pulverized coal preparation system. **Key words:** drying capacity, primary air, unit consumption of energy, pulverized coal preparation system

热力系统可靠性分析的问题与对策 = **Problems Concerning the Reliability Analysis of a Thermodynamic System and Some Relevant Observations** [刊, 汉] / CHAI Qi, CHEN Wen-zhen, SUN Feng-rui (Nuclear Energy Science and Engineering Department, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—669 ~ 672

With a thermodynamic system serving as an object of study the problem of reliability is explored from the viewpoint of a basic concept, method and an engineering background. The authors have made some observations concerning the resolution of the above-cited problem. **Key words:** thermodynamic system, dynamic characteristics, reliability analysis, countermeasures

复合燃烧技术在链条炉上的应用 = **The use of Compound Combustion Techniques on a Chain Grate Stoker** [刊, 汉] / WANG Yan, DING Xue-hua (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—673 ~ 674

Presented are the specific features concerning the use of compound combustion techniques on chain grate stokers. **Key words:** compound combustion, mechanism, combustion process, technical characteristics

水垢引起水冷壁爆管和锅筒鼓包爆破的原因及预防 = **The Causes of Scale-caused Waterwall Tube Explosion and Boiler Drum Bulging-related Explosion and Their Prevention** [刊, 汉] / Tian Lin-qi, Kuang Ping-jian (Boiler and Pressure Vessel Inspection Institution under the Harbin Municipal Labor Bureau, Harbin, China, Post Code: 150076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—675 ~ 676