# 第1章 绪论

## 1.1课题研究背景和意义

中国作为全世界最大的发展中国家，同时又是全球经济第二大体，能源问题关系到中国经济的可持续发展。根据近几年情形来看，能源增长对于经济发展的支持比约为1:1，换句话说，要维持我国GDP每年7%~8%的增长，就要7%~8%的能源增长，支持经济的发展需要对应的能源供应增长。根据最新发布的世界能源统计数据显示，我国目前能源结构中，煤炭占了66%，包括煤、油、气等化石能源总共占89.1%，水、核、可再生能源等清洁能源占比仅为10.9%，相比发达国家，能源整体结构非常不合理。由于煤，石油，天然气等化石能源的大量使用，在全国大范围地区，出现了雾霾现象，环境污染问题十分严峻，在国际上，按照我国政府在哥本哈根会议上的承诺，到2020年单位GDP的CO2要减少排放40％～45%，清洁能源的比例要达到15%，压力巨大。低碳发展已然成为发展经济的迫切要求。为了解决能源危机，各国都在积极开发高效和清洁的可再生能源，其中核能被认为经济、清洁、安全、高效，是最具开发优势和发展潜力的新型能源。2011年2月，国务院发布的《中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究》指出，到2020年中国核电总装机量可能实现7000万千瓦目标。因此，核电有着不可估量的发展前景。

但是，核电在其历史发展过程中发生过一系列严重的核电安全问题。1986年4月26日，切尔贝利核电站的四号机组在试验中发生爆炸，28人因遭受严重辐射死亡，13.5万人无家可归，专家估计此次核电站事故的核污染相当于日本广岛原子弹的100倍，成为历史上最严重的一次核电站事故，也是首例被国际核事件分级表评为第7级事件的特大事故。2011年3月，日本福岛核电站发生泄漏事故，是第二个被国际核事件分级表评为第7级事件的特大事故。福岛核电站事故，不仅对日本的经济、政治、环境、社会造成了严重的影响，也对世界人类在核能利用和管理方面提出了新的质疑和挑战。核电安全是核电发展的根本要求和生命线，是国家安全的一部分，这需要研究人员对核电安全问题进行深入研究。

核电站主要通过一系列的设备实现核能——热能——动能——电能的转换，其中管道犹如核电站的“血管”，负责流体的传输。核电站管道一般为金属材料，管道中存在非等温的流体，温度的交变变化，相应地管道膨胀和收缩，但是由于自身限制，使管壁的应力状态不断变化，使管道产生热疲劳裂纹，随着热疲劳裂纹不断扩张，最终产生贯穿性裂纹，最终导致设备失效。根据流体温度的不同，可以将管道热疲劳机理大致可以分为四大类：（1）冷热流体混合型，此种形式有两种情况，一种是当冷热流速较高的时，混合区域的流体温度会按数赫兹至数百赫兹的频率在管道内发生变化，如图1.1所示；另一种当冷热流体流速较低时，开始时会在合流处形成热分层，经过一定距离之后才完全混合，如图1.2所示。两种形式可能在流体交汇处或者下流管段产生热疲劳，导致裂纹的出现；

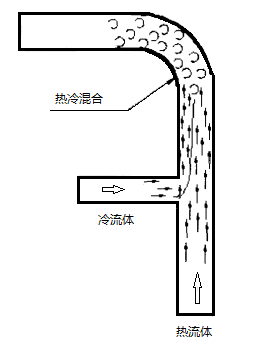


图1.2 冷热低俗混合

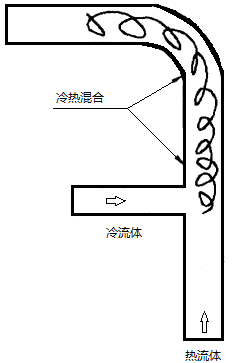


图1.1 冷热高速混合

（2）阀门泄漏，一回路管道常有不能隔离的支管与之相连，在支管自然对流区会形成稳定的热分层，如果支管阀门密封不严，存在间歇性泄漏，间歇性泄漏会导致原有的热分层发生交替变化，从而发生管道热疲劳；（3）湍流侵入，主管道流体温度和流速的扰动会在支管入口处形成湍流，并且侵入支管中，高温流体会打破原有的支管的冷热分层，会导致支管中冷热分层发生周期变化，从而管道发生热疲劳；（4）系统瞬变，管道系统因运行工况的改变，管道中的温度、压力会发生变化，热应力相应也会变化，热应力累积到一定次数，也会发生管道热疲劳现象。一般在管道在核电站反应堆冷却剂系统中，存在大量输送流体的管道，若管道失效，则有可能引发冷却剂泄漏，从而造成放射性物质泄漏，进而影响工作人员的身体健康，甚至威胁他们的生命，一旦放射性物质排出，会严重污染环境，因此管道安全成为核电站安全的重要组成部分

由于核电安全运行问题非常敏感，涉及到经济、政治、社会诸多问题，因此核电站的小型事故很少公开。2000年,日本学者奥四恭令从美国核管理委员会(NRC)组织的国际会议论文中，收集了部分关于核电站管道热疲劳事故的统计数据，该数据显示在1970年到1999年，30年期间，核电站管道热疲劳引起管道破裂的事故在全世界就收集到了54件。在2000年的时候，全世界运行的核反应堆总数为341堆,所以30年时间平均每堆发生热疲劳事故发生的概率为15.8%，这个数据有效地说明热疲劳事故发生的概率非常惊人。2008年，法国人Faidy在一份报告中详细记录了对58个核电站主要装备的检修结果，几乎无一例外在不同部位都发现了热疲劳裂纹。1998年5月，在法国Civaux核电厂发生泄漏事件，后来据相关机构调查发现在RRA系统中热交换器出口管道同旁的T型管的连接管下游第一个弯头处的纵焊缝上产生了约188mm长的热疲劳裂纹，在国内某核电站在检修时也发现过严重的热疲劳裂纹，此类裂纹具有隐蔽性，不易察觉，是“隐形杀手”，在周期性的载荷的循环作用下，或者一旦突然遇到地震，海啸等其他外载荷的联合作用，必然导致管道破裂，其造成的后果不堪设想。

## 1.2研究现状

核电站管道热疲劳现象十分复杂性，涉及热学、力学、计算机和材料学等其他学科领域，许多核电大国纷纷成立了专门研究组织来研究核电站热疲劳问题。2001年，欧盟成立“THERFAT”工程，专门研究核电站管道热疲劳问题，该组织通过实验和数值模拟的方法，研究了T型管道在混合处的流动状态和温度波动情况，并进行管道的应力和疲劳分析，探索先进的疲劳分析方法，提出一种解决欧洲热疲劳的基本分析路线。2003年，日本机械工程师学会(JSME)发表了关于高周热疲劳的手册。在美国，ASME也在进行疲劳曲线的改进计划。

研究热疲劳主要有两种方法：实验和数值模拟。实验可以得到更加真实和准确的结果，但是其所需费用高，研究周期长，测试点的选择也有限制，而且管道在运行时还承受约15MPa的内压，实验中管内的压力多为正常的大气压或者保证流体所需的压力。随着数值模拟方法和计算机技术的不断发展，有限元法的广泛应用，与实验方法相比，数值模拟通过计算机模拟，在短时间内，利用较少的费用就可得到比较真实的结果，并且可以模拟仿真到真实情况下不能进行检测的点。下面简要介绍研究者对核电站管道热疲劳在数值模拟方面的研究进展。

2005年，Haddar等研究者，在进行热疲劳试验的同时，基于弹塑性热力学和广义的Paris定律，对裂纹的萌芽和扩张进行了数值模拟研究。数值计算采用2D模型，并利用了一种有效的网格重划分技术。在模拟裂纹产生时利用线性损伤模型,并在弹塑性载荷下模拟裂纹的生长,数值结果完全符合试验结果。该研究给出了评估裂纹连续产生、在原来裂纹基础上产生新裂纹和新裂纹对原来裂纹屏蔽作用的标准。

2005年，Stephan等研究者以1998年5月CIVAUX核电站余热排出管道热疲劳事故为背景，分别使用试验和数值模拟的方式分析事故原因。其数值模拟计算非等温流在空间和时间的不同变量时，釆用大涡模拟的湍流方程进行求解。在计算流体各参数的同时也计算了管壁的温度，并把管壁温度的计算结果用在随后计算管壁的应力中。

2009年，Kamide等人研究了T型管道主、支管的管径比为时，交汇处的流动和传热状态。根据动量比的不同，可将交汇处的流形分为三种：壁面射流、偏转射流和击射流。其数值计算基于有限差分法，计算壁面射流时，在交汇处下游出现了类似于卡曼漩祸的交替漩涡发展。计算因漩涡结构引起的温度波动频率与试验结果相同，并且漩涡的结构和大小由管径和流速决定。

2010年，Walker等人在利用商业软件ANSYS-CFX-10计算了T型管道交汇处的湍流流动。其模型中，主管为直管,主、支管的夹角为90°，管内径都为51min管内流体中并含有不同浓度的离子。分别采用k-ε、SST和BLS雷诺应力模型计算管内流动的稳态解。发现当减小施密特数时，计算的结果更接近试验结果。当利用模型增加系数Cy时,无论是浓度场还是速度场都可以得到与试验吻合的结果。

与国外相比，国内对核电站管道热疲劳数值模拟方面的研究相对较少。吴海玲等研究者采用k-ε湍流模型,对流速比为0.05和0.5时的非等温横向射流进行了数值模拟，得到了管壁的温度场，定性的讨论了管壁在不同流速比下承受的热冲击,并为管道运行工况的优化设计提供理论依据。

朱维宇等研究者通过大涡模拟(LES)对T型管道内冷热流体混合过程的流动与传热情况进行了数值模拟,获得了混合区域内的瞬时温度,通过时均值和均方根值来描述温度的平均大小和波动程度。结果表明,在主管下游离主管和支管交汇中心不远处区域内温度波动最为剧烈，对T型管道的设计和优化具有重要的理论指导意义。

值得关注的是，为了监测核电站的主管道或辅助管道疲劳状态，国外核电站目前已经开发出疲劳监测系统，并安装在核电站以此来测试管路当前在线的疲劳状态。目前，国际上已经研发了多种相应的疲劳监测系统，见表1。

表1 已开发的疲劳监测系统汇总表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 产品名称 | 开发商 | 国家 | 应用机组 |
| FatiguePro | EPRI/SIA | 美国 | 84+ |
| WESTEMSTM | 西屋公司 | 美国 | 8 |
| FAMOS | Siemens/KWU | 德国 | 31 |
| SYSFAC  (Fariguemeters) | EDF | 法国 | 计划推广到多数EDF机组 |
| SACOR  SACOR | 俄罗斯“水压机”实验设计局、俄核电站科学研究院 | 俄罗斯 | 6+1 |
| FAMS | 关西电力 | 日本 | 2+ |
| K\_FAMS | Korea Atomic Energy Research Institute | 韩国 | 1 |
| TSMS | ELETRONUCLEAR | 巴西 | 1 |

截止2011年12月31日，世界上在运机组数量达到435台( 包括中国16台) ，在建机组数量为64台( 包括中国26台)。这其中，超过130台机组已安装相应的疲劳监测系统，但未安装监测系统的机组比例仍相对较高(达到73%)。

而在国内，疲劳监测应用领域还局限于理论研究和探索分析阶段，并未有效打破国外的技术垄断和封锁。除台山核电站（中广核集团，EPR技术路线）采用 FAMOS系统及三门核电站（中核集团，AP1000技术路线）采用 FatiguePro系统外，其它在役及在建电站均未配置电厂疲劳监测系统。

## 1.3本课题主要研究内容

查阅国内外文献发现，目前关于核电站管道热疲劳方面的研究非常少，可供分析的数据也不是很多了，在对热疲劳数值模拟方法方面大多采用研究管内流体的流动传热和管道内壁的传热情况，或者采用在管壁上施加温度边界条件来研究管壁的热疲劳裂纹的产生以及扩展过程，很少有研究者关注管道热应力的状态。因为热疲劳是热应力引起的，所以，热应力的大小是直接影响热疲劳强度的因素。另一方面，在核电站工作工程中，有温差的流体流入核电站冷却剂系统中的管道，在该过程中存在管道内流体的流动和传热、管道结构本身的热传导和流体和管壁界面传热。目前在大多研究者对流体和管壁之间的传热的研究获得了一些成果，然而在流体和管壁界面传热的方面研究没有，忽视流体和管道流固耦合作用。Chida对共轭传热问题进行了量纲分析，得到了同时考虑流体和固体热物理性质的无量纲参数组合，并提出在非稳态共轭传热问题中，流固两种物质在界面处的耦合影响必须考虑，因此需要对在核电站冷却剂系统管道中流体和管壁界面的流固耦合作用进行研究。

本课题采用有限元数值模拟分析，在温度负载的情况下，考虑管道流体的流动和传热，管壁的传热，流体和管壁界面传热的共轭传热问题，采用多场间的流固耦合研究直管，弯管，T型管道的应力状态。本课题采用的技术路线如下图：

管道温度

流体温度

温度

流固界面耦合传热

热应力

泊松比

弹性模量

热膨胀系数

图1.3技术路线图

利用商业软件ANSYS-Workbench软件对管道，进行合理简化，建立相对应的管道模型，并进行划分网格。首先，在Fluent模块中，对流体的进行计算，求解流体的流动和传热状态。接着，在Steady-State-Thermal中，利用第一步求得界面耦合温度，求解管道的温度状态，最后，在Static-Structural模块中，将第一步的所求得对界面耦合的压力，以及第二步中管道的温度作为初始条件，求解管道的热应力。本文主要内容：

1. 通过对核电站管道结构做适当的简化，建立合理的流固耦合数值模拟模型；
2. 通过改变管道结构，分析管道结构与热应力之间的关系；
3. 对T型管道进行冷热混合现象进行稳态和瞬态数值模拟，考虑流固耦合在界面处的影响，阐述温度负载与热应力的影响规律；

## 1.4本章小结

本章主要介绍课题的研究背景及其意义，阐述核电站管道热疲劳问题和核电 站管道安全的重要性，概述了国内外对热疲劳数值模拟的研究现状，并在此基础上提出了本课题的研究主要内容。

# 第2章 热疲劳理论基础

## 2.1引言

热胀冷缩是大自然十分常见的现象，核电站管道一般为金属材料，管道内的流体温度交变变化，相应地管道膨胀和收缩，但是由于自身限制，使管壁的应力状态不断变化，从而使管道受到热疲劳损害。因为热疲劳是热应力引起的疲劳，所以，热应力的大小是直接影响热疲劳强度的因素。为了得到管道的热应力的状态，需要考虑流固耦合作用，进行数值模拟仿真。本章将简要介绍进行数值模拟涉及的基础理论。

## 2.2热疲劳应力理论基础

由温度变化引起的膨胀或者收缩受到物体自身约束，在物体内产生应力，称为热应力。这种应力产生的根本原因是温度变化和自身约束作用。一根金属捧长为，直径为，初始温度为，均匀受热后，温度升至，金属棒的伸长量为

(2.1)

则应变

(2.2)

式中：为材料的线膨胀系数，温度变化不大时，其值可为常数。

如果金属棒的膨胀是自由，即不受自身约束，则不会产生热应力，但是若将金属棒两端固定，使其不能沿着长度方向自由伸缩，则会产生热应力。如图2.1所示，长度L，直径为d的金属棒固定在刚体壁面。

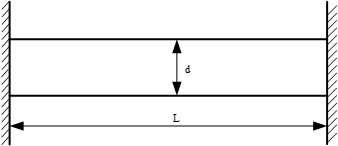


图2.1 两端固定的金属棒

对金属棒进行加热处理，因受到自身约束，金属棒无法膨胀，就会在棒内产生压缩热应力，若假设金属棒的弹性系数为E，则产生了与式中(2.2)中其应变产生的应力为

(2.3)

这就是著名的胡克定律，即应变与应力成正比。同理，将一维空间扩张到三维空间，现取一个微小平行正方体，边长分别为dx，dy，dz，如图2.2所示。根据物体的热胀冷缩性质，在自由状态情况下，温度由增至到，即温度的变化时，dx，dy，dz的边长分别为(1 +t)dx、(1 +t)dy、(1 +t)dz，即对于各向

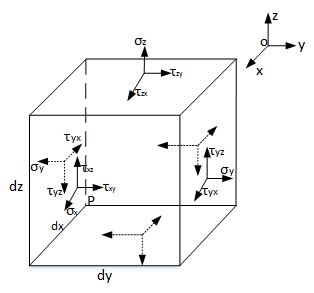


图2.2 微平行正六面体

另外，在同一物体内部，如果温度分布是不均匀，虽然物体不受外界约束，但由于各处的温度不同，每一部分因受到不同温度的相邻部分的影响，不能自由伸缩，也会在内部产生热应力。

## 2.3有限元理论基础

有限元方法的思想最早可以追溯到古人的“化整为零”、“曹冲称象”。将复杂问题的系统分解为一个个部件或者“单元”，而这些部件或者“单元”已被大家熟悉，在利用这些部件或者“单元”重构原始系统，从而分析整个系统的行为。1960年，Clough[20]在处理平面弹性问题时第一次提出并使用“有限元方法”，最终发展为标准的计算方法。利用有限单元法进行数值分析的过程如下：

1. 建立有限元模型：根据实际模型建立需要用于计算的有限元模型，边界条件；
2. 合理的选择直接影响到结果的准确性；
3. 划分网格：网格质量的好坏直接影响到结果的精确性，需用最小的计算成本；
4. 满足所要求的求解精度，划分合适的网格很重要；
5. 单元分析：根据所选的单元类型及差值函数建立单元矩阵；
6. 矩阵总装：将各个单元矩阵组装成总体矩阵；
7. 求解有限元方程：根据所设定的边界条件，釆用直接法、迭代法和随机法等方法，对离散后形成的线性方程组进行求解；显示和输出结果：可以通过云图、矢量图和等值线图等方式显示和输出计算结果。

## 2.4流固耦合数值模拟理论基础

在核电站管道系统工作过程中，存在管道内流体的流动和传热、管道结构本身的热传导以及流体和管壁界面传热。这是典型的热流固耦合问题。此类问题是（温度场，流场与固体场）间的相互作用。流固耦合问题既涉及固体域求解，又涉及流体域求解，两者不能忽略。同时考虑流体和固体结构特性，流固耦合可以有效节约分析成本和时间，同时保证结果更接近物理现象本身的规律。流体的流动需要遵循物理物理守恒定律，基本的守恒定律包括质量守恒定律，动量守恒定律，能量守恒定律。

### 2.4.1质量守恒方程

连续性方程即质量守恒方程，由单位时间内流出控制体的流体净质量等于同时间内时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，其微分表达式为：

(2.4)

式中：为密度，单位kg/m3；t为时间，单位s；、、分别为、、三个方向的速度分量，单位m/s。

对于恒流而言，有；则公式(2.4)的形式变为：

(2.5)

如果是不可压缩液体，单位时间单位体积空间内流入与流出的液体体积之差等于零，即液体体积守衡，公式(2.4)则变为：

(2.6)

连续性方程是流体流动微分方程是最基本的方程之一，任何流体的连续都必须满足。

### 2.4.2动量守恒方程

动量守恒，即对于一给定的流体微元，其动量对时间的变化率等于外界作用于在该微元体的各种力之和，动量方程也称为纳维-斯托克斯方程，

根据这一定律，可以导出x、y、z三个方向的动量方程为：

(2.7)

(2.8)

(2.9)

式中：为哈密顿微风算子， ,为密度，单位kg/m3，为流体微元体上的压强，单位Pa，、、、、、等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力的分量，单位Pa；、、为x、y、z为三个方向的单位质量力，单位m/s2。

### 2.4.3能量守恒方程

能量守恒定律是包含热交换的流动系统必须满足的基本定律，其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律，微元体中的能量的增加率等于进入微元体的净流量加上质量力与表面力对微分体所做的功，其表达式为：

 （公式6）

式中：E为流体微团的总能，单位：J/kg，包含内能、动能和势能之和，

E=h-P/ρ+u2 /2;h为焓，单位J/kg；hj为组分j的焓，J/kg；Keff为有效热传导系数，单位W/(m.k),keff=kt+k,kt为湍流热传导系数，根据所用的湍流模型来确定；Jj为组分j的扩通量；Sh为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

流固耦合问题按流固机理可分为两大类：

1. 耦合作用仅仅发生在两相交界面上，在方程上的耦合是两相耦合面上的

平衡及协调引入。

1. 两域部分或全部重叠在一起，难以明显的区别开来，使描述物理的描叙

方程，特别是本构方程需要针对具体的物理现象来简话，其耦合效应通

过描述问题的微分方程来体现。

对应的求解方式又分为：单向流固耦合和双向流固耦合。当流体作用于固体后，固体的变形很小，而且固体变形后对流体的影响很小，不改变整个流场的流动状态时，可以使用单向流固耦合方法。尤其是先计算出流场的流动状态，把比较关心的量作为结果输出后作为载荷施加到固体上，然后在固体进行数值计算。当流体作用于固体后，固体的变形较大，而且固体变形对流场的影响比较大，改变了整个流场的流动状态时，需考虑固体变形后对流场的影响，此时必须使用双向流固耦合方法。

### 2.4.4固体控制方程

### 2.4.5传热方程

## 2.5湍流模型理论

流体，在静止时，不会受到切应力，然而，在运动时，相邻间流体因相对运动承受粘性力。它有两种形态：层流和湍流。层流流体运动有规则，各个部分互不掺混，且流动稳定；湍流运动不规则，各部分剧烈掺混，且非常不稳定。流体流动的特性由雷诺系数确定，其公式如下：

(2.9)

式中：为流体的密度；为流体速度；为流体运动粘度系数；为特征尺寸，可以取长度x，直径d。

对于管道流体，当雷诺系数Re小于2300时流动为层流，大于8000时流动为湍流，介于两者之间时流体流动为层流和湍流之间。图2.2表明：在雷诺系数(Re>2300)足够大时，刚进入管道时，流体为平行于管道壁面的层流，随着流体继续流动，层流向湍流转变，变为没有规则，不稳定的流动，在湍流的尾部，又发展为平行于管道壁面的层流，在管道壁面处的速度为零，在中心轴上速度最大，且速度对称分布。

湍流是非定常的、不规则运动。科学家早期认为湍流中的流体就像分子一样做布朗运动，是完全不规则的运动。但是经过大量实验证明：湍流是由许多大小不同尺度的漩涡组成，且结构具有不规则的运动。大尺度的涡影响平均流动，小尺度的涡起耗散作用。在湍流流动过程中，一个大尺度的涡中有很多小尺度的涡，大尺度的涡给予小尺度涡速度，小尺度的涡又包含更小尺度的涡，如此重复，直到小尺度的涡将动能粘性耗散。尽管湍流流动复杂，且非线性，但是研究人员可以通过数值模拟对湍流进行研究。虽然纳维-斯托克斯方程是描述流体运行的控制方程，但是如果直接使用此方程对流动进行直接数值模拟计算，必须采用很小的时间，和空间才能分辨湍流中详细的空间结构及剧烈变化的时间特征，这对计算机的性能要求很高。因此，需要引入方法，对纳维-斯托克斯方程进行简化，使之可以适合工程计算中。简单介绍湍流的数值模拟方法。

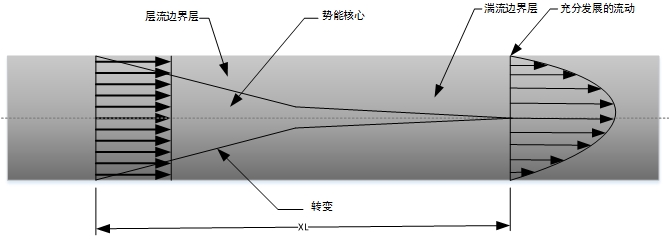


图2.2 湍流进口段内的流动

统计法

湍流数值模拟方

法法

大涡模拟(LES)

非直接方法

平均法(RANS)

直接方法

图2.3 湍流数值模拟方法

湍流数值模拟方法有两种：直接模拟方法和非直接模拟方法。直接数值模拟方法为直接求解瞬态的湍流流控制方程连续性方程。非直接数值模拟为不直接计算湍流的流动特性，而是将湍流做近似化处理。根据近似化处理方法的不同，非直接数值模拟又可以分为：统计法、大涡模拟和平均法。统计法应用的是统计理论，暂不介绍。详细介绍大涡模拟和平均法。

大涡模拟：此数值模拟方法通过大尺度的涡模拟湍流扩散、质量和能量的交换以及雷诺应力的产生，小尺度的涡来模拟耗散脉动对各个变量的影响，因此大涡模拟是把包括脉动运动在内的瞬时运动通过某种方法分解成大尺度的涡和小尺度的涡两部分。大尺度涡可以通过N-S方程直接求解。小尺度涡通过亚格子尺度模型来建立与大尺度的关系。

应用雷诺时均方程的模拟方法：将非稳态的控制方程对时间作平均,在所得到的关于时均物理量的控制方程中包含了脉动量乘积的时均值等未知量,于是所得的方程个数就小于未知量的个数。而且不可能依靠进一步的时均处理而使控制方程组封闭。要使方程组封闭,必须做出半经验假设,建立用于封闭原方程的其他模型。这种模型把未知的更高阶的时间平均值表示成较低阶的,在计算中可以确定的量的函数。

## 2.6本章小结

# 第3章 流固耦合热应力数值模拟仿真

## 3.1引言

## 3.2 管道建模

## 3.3 网格划分

## 3.4 仿真

## 3.4 本章总结

# 第4章 流固耦合热应力数值模拟分析

## 4.1引言

## 4.4 本章总结

# 第5章 总结