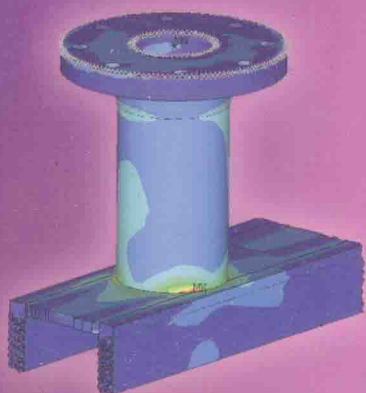
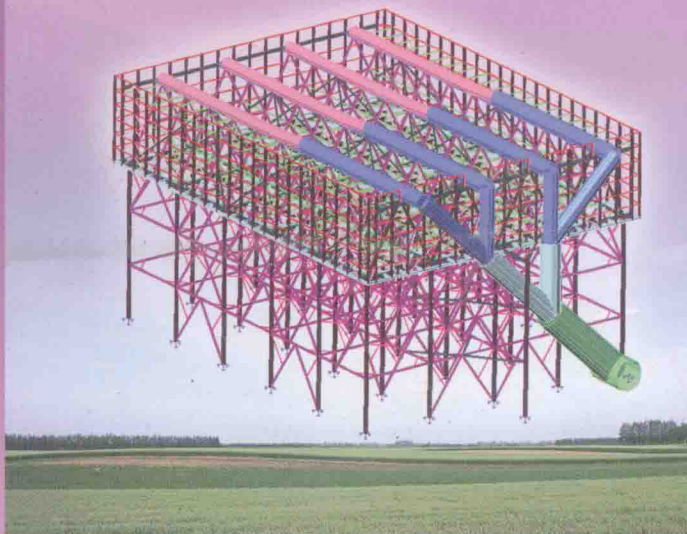
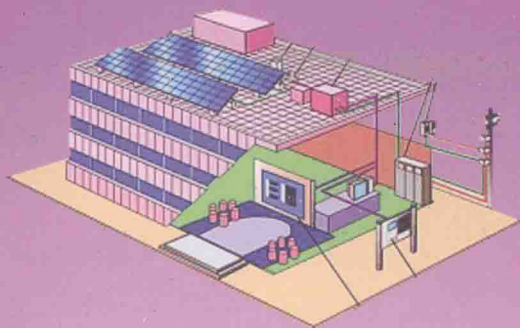


 **哈尔滨空调股份有限公司**
HARBIN AIR CONDITIONING CO., LTD.

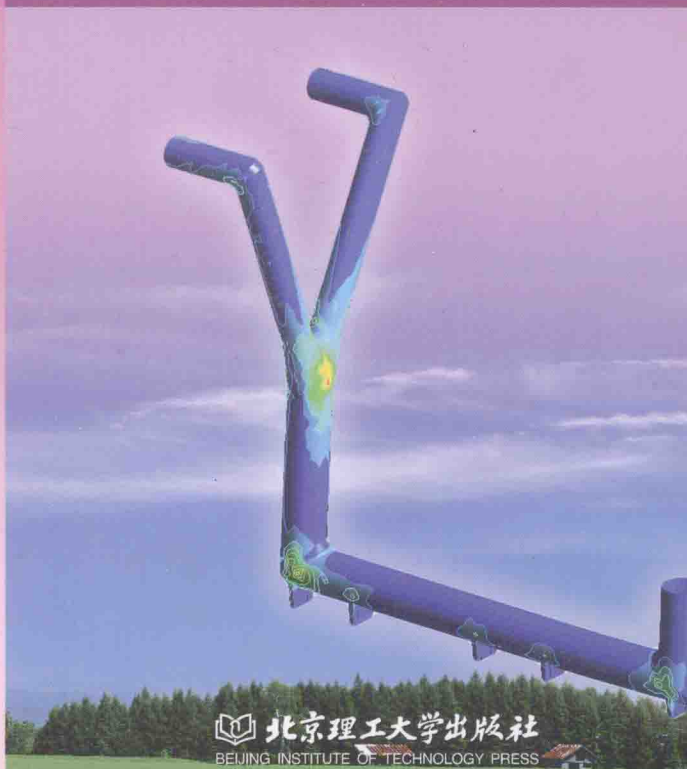
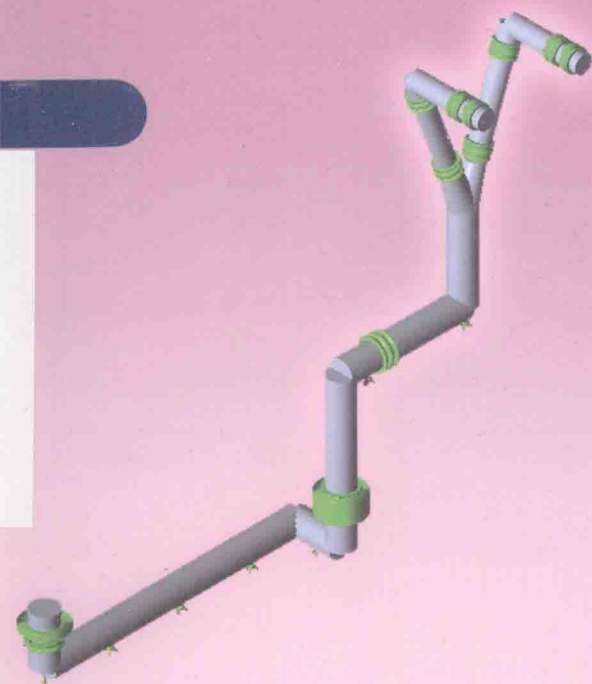
国家能源电站空冷系统研发中心
NATIONAL ENERGY BOARD POWER PLANT AIR COOLING R&D CENTER



空冷技术研究

(2013年度)

主编 杨凤明 刘万里 孙卫东
尹继英 王吉特



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014059391

TK264.1

04

2013

空冷技术研究

(2013 年度)

主编	杨凤明	刘万里	孙卫东	尹继英	王吉特
编委	齐志广	朱剑平	龚宇洋	魏家现	裘新
	冯峰	李凤满	莫非	袁萌	王立志
	解轲	武春旭	于尔亮	曲方文	曾辉
	何文汇	吴凤来	姜书寅	徐全勇	刘官郡



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1745789

K264.1
04
2013

内 容 简 介

哈尔滨空调股份有限公司暨国家能源电站空冷系统研发中心在国家空冷产品国产化中扮演着重要的角色,致力于空冷先进技术的研发与创新,本书是以2013年度哈尔滨空调股份有限公司所承接的项目为载体,以工程实际遇到的问题为科研出发点,以解决问题并满足工程需要为目标的科研著作,同时本书也关注国内外先进的空冷技术,努力探究与研发。

本书共分为11章,内容涵盖了排汽管道内部流体诱发振动分析,空冷系统功能分析研究,空冷钢结构平台谐响应分析,主排汽管道力学分析研究,高压管箱仿真分析研究,空冷热浸镀锌钢结构研究思路分析,空冷项目现场安装技术分析,直接空冷冷却风系统改造可行性方案分析研究,新能源发展现状与展望,直接空冷火力发电厂空冷岛照明规范研究,烟台合一技术分析研究。

本书在紧密结合实际工程项目的同时,关注国内外先进空冷技术发展,笔者希望通过工程实例及简单的语言将笔者掌握的知识及空冷技术发展趋势介绍给广大读者。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空冷技术研究. 2013年度 / 杨凤明等主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 9493 - 5

I. ①空… II. ①杨… III. ①空气冷却-技术-研究 IV. ①TK264.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 171352 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 7.5

字 数 / 154 千字

版 次 / 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 30.00 元

责任编辑 / 刘 娟

文案编辑 / 王晓莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

做技术一流企业.

杨风明

哈尔滨空调股份有限公司总经理杨风明先生
于二〇一四年五月为本书题词

国家能源电站空冷系统研发中心
哈尔滨空调股份有限公司
空冷技术研究（2013 年度）编辑委员会

主编：	杨凤明	刘万里	孙卫东	尹继英	王吉特
编委：	齐志广	朱剑平	龚宇洋	魏家现	裘 新
	冯 峰	李凤满	莫 非	袁 萌	王立志
	解 轲	武春旭	于尔亮	曲方文	曾 辉
	何文汇	吴凤来	姜书寅	徐全勇	刘官郡

序

哈尔滨空调股份有限公司是在国内外享有盛誉的电站空冷器、石化空冷器、核电空气处理机组的专业生产厂和出口基地，公司产品的品种、生产规模、技术、质量、效益均处于全国同行业的领先水平。与此同时，随着科学技术的迅猛发展，空冷技术也在不断地更新、进步，公司也明确地认识到科技研发创新将成为企业可持续发展的核心动力。

本书的作者都是行业资深的工程师，并在国家能源空冷研发中心的平台上工作了多年，拥有扎实的理论基础及丰富的工程经验，并能够熟练掌握各种有限元分析技术，可以实现理论与实践的完美结合，代表了国际一流的工程项目设计研发水平。

本书是继《空冷技术研究（2010 年度）》《空冷技术研究（2011 年度）》与《空冷技术研究（2012 年度）》之后的又一科研成果汇编集，是在继承前几年科研成果基础上的进一步创新与突破。

愿将此书的科研成果与广大读者共享和交流，创造行业内更加频繁的技术切磋与交流的良好氛围，提高全行业整体的设计研发水平，为我国空冷行业的发展尽绵薄之力，为祖国的科技进步做出我们科技企业应有的贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张杰' (Zhang Jie), located in the lower right quadrant of the page.

前 言

本书以哈尔滨空调股份有限公司的工程项目及科研项目为实例，内容涵盖空冷系统设计中的管道、工艺、流体、电气、热控专业，从专业角度出发，解决系统设计存在的问题，并对空冷系统新技术进行探究。

本书共分 11 章：第 1 章是排汽管道内部流体诱发振动分析；第 2 章是空冷系统功能分析研究；第 3 章是空冷钢结构平台谐响应分析；第 4 章是主排汽管道力学分析研究；第 5 章是高压管箱仿真分析研究；第 6 章是空冷热浸锌钢结构研究思路分析；第 7 章是空冷项目现场安装技术分析；第 8 章是直接空冷冷却风系统改造可行性方案分析研究；第 9 章是新能源发展现状与展望；第 10 章是直接空冷火力发电厂空冷岛照明规范研究；第 11 章是烟塔合一技术分析研究。

本书由国家能源电站空冷系统研发中心、哈尔滨空调股份有限公司相关人员编写，并在五位主编的指导、统筹及全体编委的辛勤工作下得以顺利完成。哈尔滨空调股份有限公司北京空冷技术研发中心（国家能源电站空冷系统研发中心北京空冷技术研发中心）全体成员在本书的编写过程中付出了大量辛勤的劳动，在此一并感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，同时欢迎相关技术人员进行交流学习。

编 者

目 录

第 1 章 排汽管道内部流体诱发振动分析	1
1.1 概述	1
1.2 分析方法	1
1.2.1 流固耦合有限元方程	1
1.2.2 分析工具	3
1.3 建模及分析	3
1.4 结论	6
第 2 章 空冷系统功能分析研究	7
2.1 概述	7
2.1.1 空冷凝汽器系统原理	7
2.1.2 空冷凝汽器的构成	7
2.2 空冷凝汽器的控制系统	7
2.2.1 总则	7
2.2.2 一般功能	8
2.3 空冷系统	8
2.3.1 排汽管	8
2.3.2 风机组	9
2.4 辅助系统	10
2.4.1 真空系统	10
2.4.2 凝结水系统	13
2.5 空冷系统运行	15
2.5.1 总则	15
2.5.2 运行方式	16
2.5.3 空冷系统启动顺序	16
2.5.4 空冷系统停止顺序	19
2.6 汽机背压控制	20
2.6.1 概述	20
2.6.2 风机步序配置	20

2.7 空冷系统防冻保护	20
2.7.1 概述	20
2.7.2 凝结水过冷保护	20
2.7.3 逆流管束回暖	21
2.7.4 抽空气过冷保护	23
第3章 空冷钢结构平台谐响应分析	24
3.1 计算分析模型	24
3.2 计算结果分析	24
第4章 主排汽管道力学分析研究	27
4.1 目的	27
4.2 方法	27
4.3 材料	27
4.4 载荷	27
4.5 膨胀节	27
4.5.1 地面上的水平管道	27
4.5.2 平台上水平管道	28
4.5.3 每一列上升管	28
4.6 隔离阀	28
4.7 模型	28
4.8 结果	28
第5章 高压管箱仿真分析研究	30
5.1 前言	30
5.2 几何模型	30
5.3 设计条件	31
5.4 材料属性	32
5.5 有限元模型	32
5.6 定义载荷	33
5.7 分析结果 (一)	33
5.8 分析结果 (二)	35
5.9 结论	37

第 6 章 空冷热浸锌钢结构研究思路分析	38
6.1 热浸锌高强螺栓性能试验	38
6.1.1 力学性能测试	38
6.1.2 镀锌层厚度测定	39
6.1.3 镀锌连接高强螺栓预拉力松弛损失的测定	39
6.2 热浸锌钢构件高强螺栓连接抗滑移性能研究	39
6.2.1 概况	39
6.2.2 热浸锌连接件的抗滑移试验	39
6.2.3 第二项试验需用试件数	40
6.2.4 抗滑移试件设计 (材质: Q345B)	42
第 7 章 空冷项目现场安装技术分析	43
7.1 概述	43
7.2 现场要求	43
7.3 安装顺序	44
7.3.1 支撑平台安装的组成部分	44
7.3.2 风筒和风机护网	45
7.3.3 风机桥架的组装	46
7.3.4 预组装后的风机桥架的吊装	46
7.3.5 A 型支架和分隔墙在地面的组装	47
7.3.6 管束的吊装、调整就位和焊接	47
7.3.7 爬梯和步道平台的吊装	49
7.3.8 主管道 (排汽管道) 的安装	49
7.3.9 蒸汽分配管道的安装	49
7.3.10 风墙的吊装	50
7.3.11 凝结水系统	50
7.3.12 抽真空系统	50
7.3.13 管道系统性能	50
7.3.14 严密性试验 (气压试验)	50
7.3.15 超压试验的临时措施	50
7.3.16 真空系统	50
7.3.17 凝结水系统	51

7.3.18	保温/人员防护	51
7.3.19	爆破膜的安装	51
7.3.20	涂漆	51
7.3.21	安装金属板条	51
7.3.22	修饰工作	51
7.3.23	电缆敷设、电缆桥架和仪表的安装	51
7.4	安装结束	52
第8章 直接空冷冷却风系统改造可行性方案分析研究		53
8.1	概述	53
8.1.1	本方案适应范围	53
8.1.2	冷却风系统设计分析	53
8.2	迎面风速影响分析	54
8.2.1	改变风机的叶片角度	54
8.2.2	提高风机转速	56
8.2.3	提高电动机输出能力	57
8.2.4	提高系统运行电压	57
8.3	冷却风系统参数确定	58
8.3.1	变压器参数确定	58
8.3.2	变频器参数确定	59
8.3.3	电动机的参数确定	60
8.3.4	减速机的参数确定	60
8.3.5	风机的参数确定	61
第9章 新能源发展现状与展望		62
9.1	前言	62
9.2	新能源介绍	62
9.2.1	分布式能源	62
9.2.2	低温有机朗肯循环 (ORC) 发电系统	65
9.3	结语	67
第10章 直接空冷火力发电厂空冷岛照明规范研究		68
10.1	总则	68

10.2	照明方式	68
10.3	照明种类	68
10.4	光源选择	68
10.5	照明灯具选择	68
10.6	照明灯具布置要求	69
10.7	照度标准	69
10.8	照度计算	69
10.9	照明网络与电压	70
10.10	允许电压降	70
10.11	照明负荷和电压损失计算与小型断路器的选择	70
10.12	导线选择与敷设	71
10.13	照明配电箱选择与布置	72
10.14	开关与插座的选择	72
10.15	接地方式	73
10.16	制图规定与符号	73
10.17	施工图中应注意的问题	74
10.18	工程建设强制性条文	74
第 11 章	烟塔合一技术分析研究	75
11.1	概述	75
11.2	烟塔合一技术的核心技术	75
11.2.1	烟塔合一技术的基础	75
11.2.2	烟塔合一的几种典型形式	75
11.2.3	烟塔合一项目的实际调研	77
11.2.4	烟塔合一技术的几个重要设计指标	77
11.2.5	烟塔合一技术的关键技术	77
11.2.6	两种烟塔合一项目需要考虑的其他因素	78
11.3	国外专业公司对烟塔合一项目的开发和应用	79
11.3.1	烟塔合一技术的理论依据	79
11.3.2	烟塔合一技术的试验验证	79
11.3.3	可以借鉴的结论	81
附录 A	空冷平台步道和单元内部照度计算	82
A1	空冷平台步道的照度计算	82

A2 空冷平台单元内部的照度计算	82
附录 B 单芯橡皮、塑料绝缘导线穿管配合表	89
附录 C 单芯塑料绝缘导线的持续允许载流量表	90
附录 D 单相 220 V (单相和零线) 电流力矩为 $1 \text{ A} \cdot \text{km}$ 的电压损失表	91
附录 E 三相四线 380/220 V 网络电流力矩为 $1 \text{ A} \cdot \text{km}$ 的电压损失表	92
附录 F TN-C-S 系统接线	93
附录 G 配置接线图格式	94
附录 H 照明部分常用符号	95

第1章 排汽管道内部流体诱发振动分析

1.1 概 述

排汽管道是电厂的主要辅机设备之一,其振动直接影响机组的安全运行。在运行中,管道的异常振动通常会导致管道及连接部件损坏,同时有噪声产生;流固耦合会引起系统振荡,降低系统运行的可靠性,恶化工作环境,影响仪器仪表精度,导致管道结合部渗漏;强烈的管道振动则往往会引起泄漏,甚至由于管道破裂而引起爆炸等恶性事故。由此可见,排汽管道的稳定性是相当重要的,它的提高有助于改善电厂的运行能力。近年来,火力发电厂中发生了多起管道振动影响机组运行的事故。因此,对排汽管道的研究有着广泛的工程背景和现实意义。

对输流管道流固耦合振动问题的研究已有较长的历史,但由于问题的复杂性和多样性,目前的研究大都针对较为简单的对象,而针对实际工程中的流固耦合进行研究的很少。本书采用有限元方法,针对现役电厂排汽管道进行流固耦合振动特性分析,计算排汽管道在耦合振动效应下的应力分布及内部流体的流场分布,从而促进流固耦合技术在实际工程中的应用。

1.2 分析方法

在工作过程中,由于管道系统流体流动状态的变化,常常引起喘振,诱发流体、管道间的耦合振动,动力学行为十分复杂,故其一直受到学术界和工程界广大研究者的重视。流固耦合力学是流体力学和固体力学交叉形成的一门力学分支,其主要研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位移对流场影响的相互作用。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间进行交互作用,变形固体在流体载荷作用下会产生变形,而固体的变形或运动又反过来影响流场性,从而改变流体载荷的分布和大小。

1.2.1 流固耦合有限元方程

流固耦合问题可由其耦合方程来定义,如式(1-1)所示。

$$\begin{cases} A\dot{U} + BUU + CP + DU = E + F \\ GU = H \end{cases} \quad (1-1)$$
$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\sigma\} = \{P\}$$

式中 $U = [u \ v \ w]^T$, U 、 P ——由全域各节点压力所组成的列矢量。

各总系数矩阵由全域各单元相应的系数阵按统一的方式叠加而成,即

$$A = \sum A^e = \sum A_{\alpha\beta}, B = \sum B^e = \sum B_{\alpha\beta\gamma}^i, C = \sum C^e = \sum C_{\alpha\beta}^i, D = \sum D^e = \sum D_{\alpha\beta}^{iK}$$

$$E = \sum E^e = \sum E_{\alpha}^i, F = \sum F^e = \sum F_{\alpha}^i, G = \sum G^e = \sum G_{\alpha\beta}^i, H = \sum H^e = \sum H_{\alpha}$$

其中, A^e 为质量矩阵, B^e 为对流矩阵, C^e 为压力矩阵, D^e 为耗损矩阵, F^e 为体积力矩阵, G^e 为连续矩阵, H^e 为边界速度矩阵。 $\{\delta\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\sigma\}$ 分别为加速度、速度、结构应力列向量。 $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ 分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。这组方程的定义域同时有流体域与固体域, 而未知变量含有描述流体现象的变量及描述固体现象的变量。一般而言, 应同时满足流体控制方程和固体控制方程。

1.2.1.1 流体控制方程

流体流动要遵循物理守恒定律, 对于一般的可压缩牛顿流体来说, 守恒定律通过质量守恒方程式 (1-2) 和动量守恒方程式 (1-3) 描述。

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (1-3)$$

式中 t ——时间;

$\mathbf{f}_f$ ——体积力矢量;

ρ_f ——流体密度;

$\mathbf{v}$ ——流体速度矢量;

$\boldsymbol{\tau}_f$ ——剪切力张量, 可表示为:

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e}$$

式中 p ——流体压力;

μ ——动力黏度;

$\mathbf{e}$ ——速度应力张量, $\mathbf{e} = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)/2$ 。

对于流体部分, 总焓 h_{tot} 形式的能量方程可以表示为式 (1-4):

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{v} \cdot \rho \mathbf{f}_f + S_E \quad (1-4)$$

式中 λ ——导热系数;

S_E ——能量源项。

1.2.1.2 固体控制方程

固体部分的守恒方程式 (1-5) 可由牛顿第二定律导出:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (1-5)$$

式中 ρ_s ——固体密度;

$\boldsymbol{\sigma}_s$ ——柯西应力张量;

$\mathbf{f}_s$ ——体积力矢量;

$\ddot{\mathbf{d}}_s$ ——固体域当地加速度矢量。

由温差引起的热变形可表示为式 (1-6):

$$f_T = \alpha_T \cdot \nabla T \quad (1-6)$$

式中 α_T ——与温度相关的热膨胀系数。

1.2.1.3 流固耦合方程

在流固耦合交界面处, 应满足流体与固体应力 (τ)、位移 (d)、热流量 (q)、温度 (T) 等变量的相等或守恒, 即满足式 (1-7) 的 4 个方程:

$$\begin{cases} \tau_f \cdot n_f = \tau_s \cdot n_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (1-7)$$

1.2.2 分析工具

Workbench 是 ANSYS 公司提出的协同仿真环境, 用于解决企业产品研发过程中 CAE 软件的异构问题。作为一个集成框架, 它整合了现有的各种应用, 并将仿真过程结合在一起。在 ANSYS Workbench 中一般采用分离解法对流固耦合进行求解。

在排汽管道的流固耦合分析中, 当计算流体的流场分布以及排汽管道的应力分布情况时, 需要考虑固体变形对流场的影响, 因此应采用双向流固耦合方法进行分析。双向流固耦合分析都是瞬态分析, 分别计算固体结构和流场, 并通过中间平台实现耦合量的交换。在每一次迭代中, 分别进行一次流体计算和固体计算, 并交换两次中间数据, 直至最终得出结论。

1.3 建模及分析

本书以典型的空冷系统排汽管道为原型, 并对其进行适当的简化, 建立暂态结构分析模块和流体分析模块, 如图 1-1 所示。

结构分析和流体分析共用 Geometry 几何模型, 在结构分析和流体分析中分别选取相应的部分进行网格划分和设置, 如图 1-2 和图 1-3 所示。结构分析在 “Transient Structural” 中设置, 流体分析在 “Fluid Flow (CFX)” 中设置, 整个流固耦合模型在流体分析的 “Solution” 单元求解, ANSYS Multi-field solver 负责整个耦合求解。

双向流固耦合分析需要设置流固耦合面 FSI, 在计算过程中通过设定的 FSI 面传递流固耦合分析数据。选取排汽管道上与流体接触的全部内表面为 FSI 面。

在流体分析设置中, 需要设置 Transient ANSYS Multi-field 耦合求解属性及求解时间步。ANSYS CFX-Pre 自动传递并读取 ANSYS 结构分析的输入文件。在流体的边界

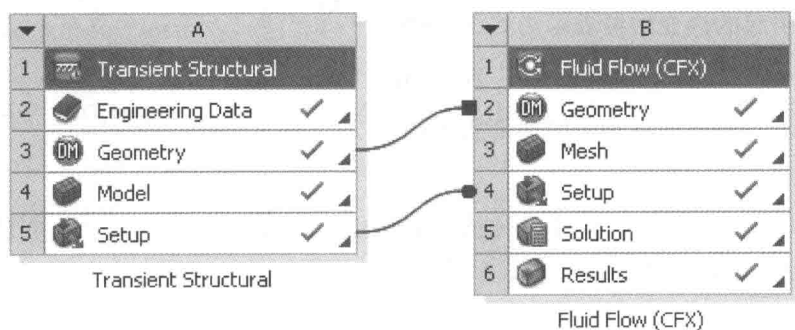


图 1-1 流固耦合框架

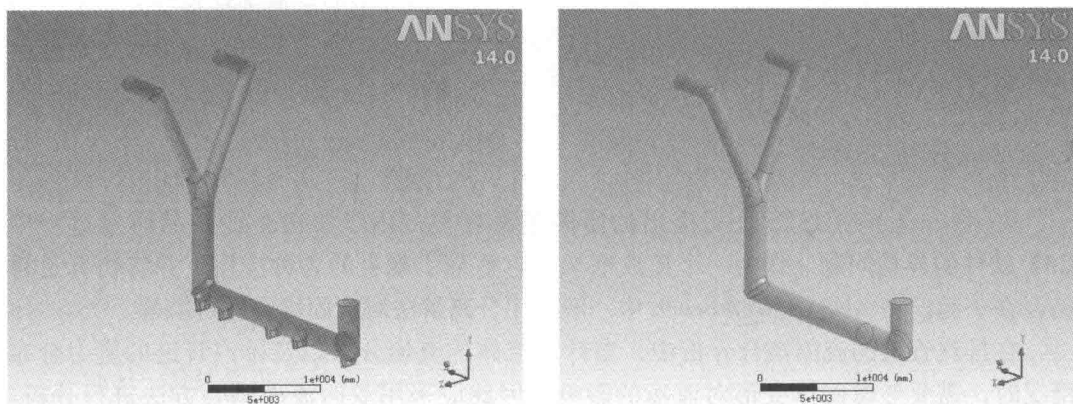


图 1-2 排汽管道及内部流体几何模型

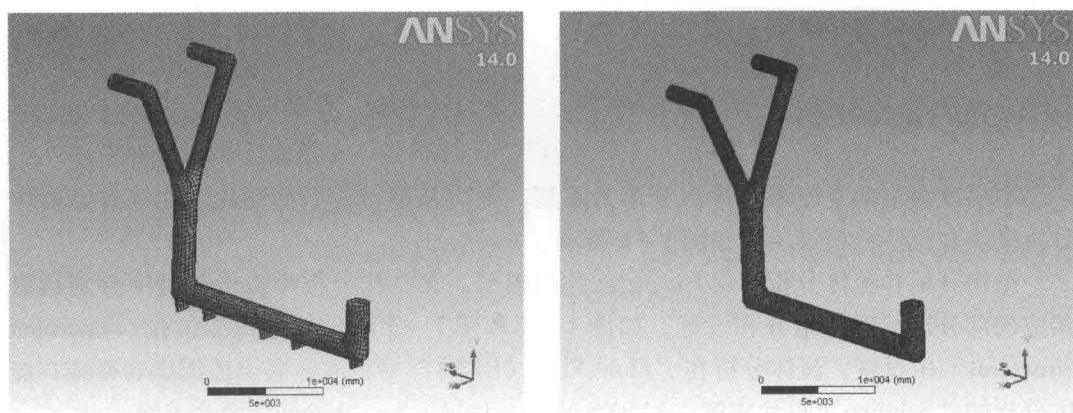


图 1-3 排汽管道及内部流体有限元模型

设置中, 设定流体的入口条件为流速 40 m/s , 出口条件为压力 20 kPa , 并设置流固耦合面边界。通过流固耦合面的设置, 在每次的迭代过程中, 耦合求解平台把 ANSYS 计算得到的耦合面的变形量传递给 CFX, CFX 根据变形后的流场进行计算, 并把计算得到的耦合面上的力传递回给 ANSYS, ANSYS 再次计算变形量, 依次循环迭代得到最终结