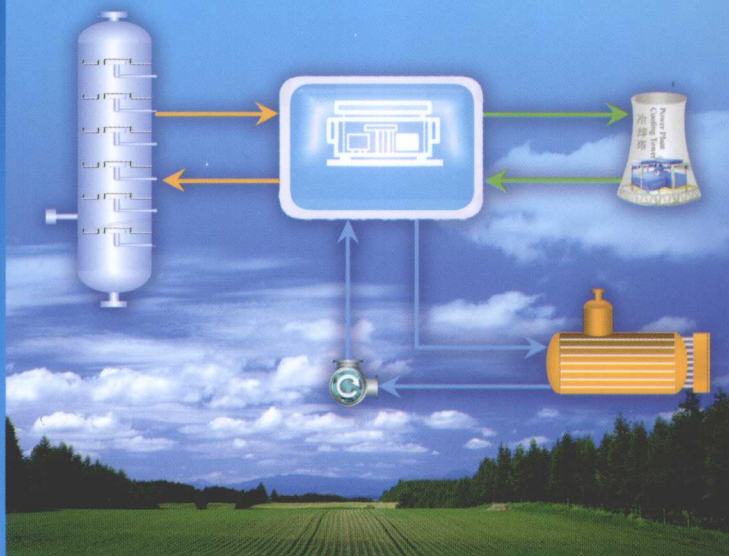


 **哈尔滨空调股份有限公司**
HARBIN AIR CONDITIONING CO., LTD.
国家能源电站空冷系统研发中心
NATIONAL ENERGY BOARD POWER PLANT AIR COOLING R&D CENTER



空冷技术研究

(2012年度)

主编 荆云涛 刘万里 宋志强
周传易 王吉特



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

013037186

TK264.1
04
2012

内容简介

空冷技术研究

(2012 年度)

主编	荆云涛	刘万里	宋志强	周传易	王吉特
编委	齐志广	朱剑平	龚宇洋	展学峰	裘新
	冯峰	魏家现	李凤满	周顺燕	袁萌
	王立志	解轲	莫非	刘宁	于尔亮
	曲方文	何文汇	吴凤来	姜书寅	徐全勇



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



北航

C1645051

TK264.1
04
2012

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致力于空冷先进技术的研发与创新,在国家空冷产品国产化中扮演着重要的角色。本书是以2012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,同时本书关注国内外先进的空冷技术,并努力探究与研发空冷技术。

本书共分为8章,内容涵盖了空冷排气管道流场分析,空冷塔钢结构抗震分析,空冷器结构及管箱有限元分析,石化空冷结构振动分析,风机桥架测试分析,空冷电厂厂用电谐波分析,现场总线在空冷电厂的应用分析等。

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洁的语言将笔者掌握的知识及空冷技术的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. 2012年度 / 荆云涛等主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 4

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7576 - 7

I. ①空… II. ①荆… 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(2013)第063208号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

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 / 6.5

字 数 / 137千字

版 次 / 2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷

定 价 / 35.00元

加工编辑 / 贾 苗

责任编辑 / 张慧峰

责任校对 / 杨 露

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

中国空调
世界的哈空调
荆云涛

哈尔滨空调股份有限公司总经理荆云涛先生
于二〇一二年元月为本书题词

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（2012 年度）编辑委员会

主编：	荆云涛	刘万里	宋志强	周传易	王吉特
编委：	齐志广	朱剑平	龚宇洋	展学峰	裘 新
	冯 峰	魏家现	李凤满	周顺燕	袁 萌
	王立志	解 轲	莫 非	刘 宁	于尔亮
	曲方文	何文汇	吴凤来	姜书寅	徐全勇

序

2012 年是哈尔滨空调股份有限公司成立 60 周年以来具有历史性意义的一年，经过 60 年来哈空调人的拼搏与努力，公司已逐渐成为了国内最大的电站空冷器、石化空冷器、核电空气处理机组的专业生产厂家和出口基地，公司产品的品种、生产规模、技术水平、质量、效益均处于全国同行业的领先地位。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。

国家能源电站空冷研发中心的成立为哈空调的研发团队注入了新鲜的血液，增强了创新的动力。本书的作者们都是行业资深工程师，并在国家能源空冷研发中心的平台上工作多年，拥有扎实的理论基础和丰富的工程经验，并熟练掌握 ANSYS、CAEAS II、CFX、STAAD 等先进的国际通用软件，代表了国际一流的设计研发水平。

本书是继《空冷技术研究（2010 年度）》与《空冷技术研究（2011 年度）》之后的又一科研成果汇编集，是在继承前两年科研成果的基础上进一步的创新与突破，同时也是为哈空调 60 周年献上的一份厚礼。

愿将此书的科研成果与广大读者分享与交流，为行业内更加频繁的技术切磋与交流创造良好氛围，愿我们能抛砖引玉，提高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。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely the name of the author or a representative of the company.

前 言

随着人类生存环境的进一步恶化，越来越多的人开始认识到节约能源、保护环境的重要性和紧迫性，以往靠消耗大量自然资源带来的经济发展模式已无法满足当今社会的需求，世界各国均投入大量人力、物力着手研究节能环保技术。

节水技术是环保技术的重要组成部分，空冷技术的节水效果好，因而得到了迅速的推广。哈尔滨空调股份有限公司作为空冷行业的领头羊投入了大量的精力进行技术研发及科研创新。

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，以专业角度出发，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8章：第1章由荆云涛、朱剑平、王吉特完成编写，主要对自然通风钢结构空冷塔的抗震性能进行分析；第2章由刘万里、裘新、徐全勇完成编写，主要对复杂管道内的流场进行分析；第3章由宋志强、龚宇洋、王立志、吴凤来完成编写，主要对空冷系统用变压器的容量选择进行分析；第4章由周传易、魏家现、齐志广、曲方文完成编写，主要对现场总线在空冷系统设计的应用进行分析；第5章由王吉特、袁萌、齐志广、姜书寅完成编写，主要对壳体结构件进行有限元分析；第6章由展学峰、朱剑平、解轲完成编写，主要对公司石化空冷产品的振动进行研究分析；第7章由朱剑平、冯峰、周顺燕、何文汇、莫非完成编写，主要通过把直接空冷风机桥架的振动的实测数据与软件模拟分析对比的方法，找到振动原因并提出解决方案；第8章由周顺燕、袁萌、于尔亮、刘宁完成编写，主要对公司石化产品管箱开孔的有限元进行应力分析。

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负责编写。在五位主编的指导、统筹下，在全体编委的辛勤工作下，本书得以顺利完成，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）全体成员在编辑过程中做了大量工作，付出了辛勤的劳动，在此表示感谢。

由于时间仓促，加之作者水平的局限性，对书中存在的不足和疏漏之处，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 自然通风钢结构空冷塔抗震分析	1
1.1 概述	1
1.2 空冷塔抗震分析	1
1.2.1 有限元模型	2
1.2.2 抗震分析一般规定	2
1.2.3 ANSYS 谱分析及振型分解反应谱法	3
1.2.4 谱分析操作流程	4
1.2.5 结果分析	5
1.3 结论	8
第 2 章 复杂形状管道流场分析	9
2.1 概述	9
2.2 几何布置与描述	9
2.3 模型网格与计算设置	12
2.4 计算结果与分析	13
2.5 结论	22
第 3 章 直接空冷火力发电厂空冷系统用变压器选型研究	23
3.1 项目研究背景	23
3.2 空冷变压器的选型研究	24
3.2.1 变压器的损耗及计算	24
3.2.2 谐波环境下变压器的损耗及计算	25
3.2.3 空冷变压器的容量选择方法	27
3.2.4 空冷系统厂用电谐波模拟与变压器容量选择计算	28
3.3 结论	30
第 4 章 PROFIBUS 现场总线技术在空冷系统中应用的研究	31
4.1 概述	31
4.2 现场总线	31

4.2.1 现场总线技术	31
4.2.2 现场总线的特点	31
4.2.3 PROFIBUS 现场总线	32
4.2.4 FF 基金会现场总线	34
4.3 现场总线在电厂的应用	35
4.3.1 现场总线在电厂运行中的意义	35
4.3.2 现场总线在电厂的应用实例	35
4.4 空冷系统中现场总线的应用	36
4.4.1 空冷工艺系统	36
4.4.2 空冷系统中现场总线的应用方案	37
4.4.3 现场总线技术的经济性分析	38
4.5 结论	39
第 5 章 壳体结构件的有限元分析	40
5.1 概述	40
5.2 材料参数	40
5.3 几何模型	40
5.4 设计条件	42
5.5 有限元模型	42
5.6 载荷定义	43
5.7 分析结果	43
5.8 结论	49
第 6 章 石化空冷结构振动分析	50
6.1 概述	50
6.2 模型建模	50
6.3 构件模态分析	51
6.4 桥架模态分析	52
6.5 施加动力荷载	53
6.6 结论	55
第 7 章 现场风机桥架振动测试分析对比研究	56
7.1 概述及基本参数	56

7.2 测点分布	58
7.2.1 西安建筑科技大学测试数据分析	59
7.2.2 风机厂家数据分析	59
7.2.3 有限元分析	61
7.3 结论及改进途径	66
7.3.1 风机激振力	66
7.3.2 电机激振力	66
7.3.3 风机桥架刚度	66
7.4 小结	67
第8章 石化管箱有限元力学分析	68
8.1 概述	68
8.2 几何模型	68
8.3 设计条件	70
8.4 材料参数	70
8.5 有限元模型	70
8.6 载荷定义	71
8.7 分析结果	71
8.8 结论	74
附录1 工况1 应力线性化数据	75
附录2 工况2 应力线性化数据	79
附录3 工况3 应力线性化数据	83

第1章 自然通风钢结构空冷塔抗震分析

1.1 概 述

随着人类生存环境的进一步恶化,越来越多的人开始认识到节约能源、保护环境的重要性和迫切性,以往靠消耗大量自然资源带来的经济发展模式已无法满足当今社会的需求,世界各国均投入大量人力、物力着手研究节能环保技术。

火力发电厂空冷系统技术因其不需要消耗大量水资源正被广泛采用。根据汽轮机排汽凝结方式的不同,空冷系统分为直接空冷系统和带表面式凝汽器的间接空冷系统。直接空冷系统——系利用机械通风使汽轮机排汽直接在翅片管式空冷凝汽器中凝结,一般由大管径排汽管道、空冷凝汽器、轴流冷却风机和凝结水泵等组成;带表面式凝汽器的间接空冷系统——由表面式凝汽器、空冷散热器、循环水泵以及充氮保护系统、循环水补充水系统、散热器清洗系统与空冷塔构成。直接空冷系统采用轴流风机强制通风的方式,需要消耗一定电能;间接空冷系统利用空冷塔进出口处的压差,形成自然通风,无需额外消耗电能。与湿冷技术相比,间接空冷系统的冷却水是密闭的,在空冷塔内不会形成水雾,而且外界环境中的冷空气进入空冷塔后被迅速加热并排出,因此保证了空冷塔内环境的干燥,改善了空冷塔的运行环境。间接空冷系统给空冷塔的结构形式提供了更多方面的选择。目前,我国已建成的空冷塔均为钢筋混凝土的结构形式,国外已有钢结构空冷塔、钢铝结构空冷塔等结构形式。与钢筋混凝土空冷塔相比,钢结构空冷塔有自重轻、可工厂化加工、工期短、劳动强度低等优点,但由于钢材成本远远高于混凝土,因此钢结构空冷塔在我国还未被广泛采用。随着技术的发展、人力成本的增加以及投资回收期的考虑,笔者认为钢结构空冷塔将有其用武之地。笔者根据伊朗某钢结构空冷塔为原型,利用 ANSYS 软件,按照我国 GB 50191—1993《构筑物抗震设计规范》进行抗震分析,并通过分析,了解并掌握钢结构空冷塔在地震作用下的相关技术特性。

1.2 空冷塔抗震分析

本文以 1 台 300 MW 机组钢结构空冷塔为例,利用 ANSYS 软件进行分析。空冷塔 0 m 处直径约为 145 m,出风口直径为 80 m,进风口高度为 28 m,喉部高度为 67.5 m,总高约为 168 m,如图 1-1 所示为空冷塔钢结构模型。

与其他结构专业软件相比,ANSYS 软件在计算弹性、弹塑性结构的地震响应时,涉及的假定较少,能更好地适用于不规则的高层及超高层钢结构构筑物的抗震性能分析。但 ANSYS 软件是通用的有限元计算分析软件,没有专门适应 GB 50191—1993《构

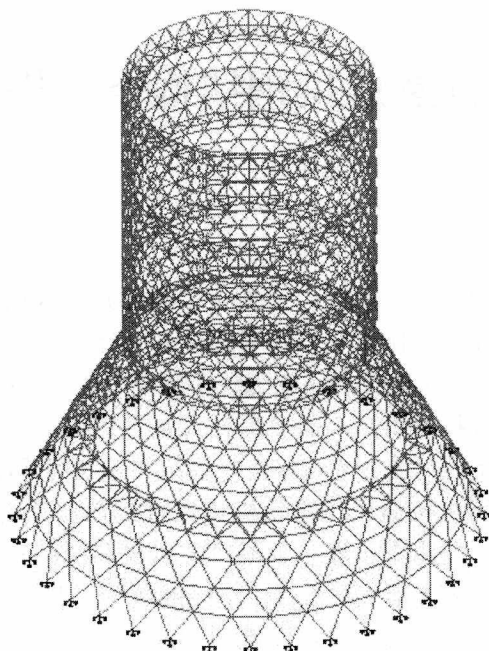


图 1-1 空冷塔钢结构模型

《建筑物抗震设计规范》条款要求的水平地震剪力提取工具，需配合 APDL 语言进行开发实现。本文以 1 台 300MW 机组钢结构空冷塔为例，利用 ANSYS 有限元软件的模态分析和谱分析功能，计算该结构在地震激励下的响应。

1.2.1 有限元模型

空冷塔直径底部为 145 m，顶部为 80 m。按照钢筋混凝土的设计经验，空冷塔外径采用双曲线过渡对结构最为有利，但为了钢结构加工制作的方便，本算例外径变化采用折线型，即在高度 0~67.5 m 处，空冷塔外径从 145 m 线性变化到 80 m，67.5 m 以上空冷塔外径保持不变。本算例采用单层网架结构形式并间隔一定距离设置加强圈，加强结构自身刚度。钢结构外围铺设轻型彩色钢板，承受环境风荷载并将其传递给主钢结构，同时起到隔绝外界空气的作用，防止空冷塔内的压力损失。

通过力学概念分析主钢结构的杆件，均为梁单元受力构件，除自身重力外仅承受风荷载及地震作用，因此杆件的主要荷载为轴力。本文中所有的钢结构杆件均采用 ANSYS 梁单元 BEAM44 进行模拟。BEAM44 是具有拉伸、压缩、扭转和弯曲功能的单轴单元。该单元每个节点有六个自由度：节点坐标系的 x 、 y 、 z 方向的平动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动。该单元允许其每一端有不同的不对称的几何形状，并且许可其端节点从梁的中心轴偏移。

1.2.2 抗震分析一般规定

根据 GB 50191—1993《构筑物抗震设计规范》的规定，对高度不超过 65 m 且质量

和刚度沿高度分布比较均匀的结构以及近似于单质点体系的结构,可采用底部剪力法等简化方法,其他结构宜采用振型分解反应谱法。甲类构筑物及其他另有规定的构筑物,除应采用底部剪力法或振型分解反应谱法外,宜采用时程分析法或经专门研究的方法进行补充计算。特别重要的或有特殊要求的构筑物以及遇地震破坏会导致极严重后果的构筑物为甲类构筑物。本算例为电厂空冷项目,不属于甲类构筑物。同时该规范提出,对地震作用下的钢筋混凝土塔筒进行有限元法计算时,宜采用振型分解反应谱法;对8度且淋水面积大于9000 m²的塔筒及9度且淋水面积大于7000 m²的塔筒进行计算时,宜同时采用时程分析法进行补充计算。因此本算例仅需采用振型分解反应谱法进行地震作用计算。

本算例位于8(0.2)度区、地震分组为第一组、场地类别Ⅱ类。根据GB 50191—1993《构筑物抗震设计规范》,其截面抗震验算的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}=0.5$, $T_g=0.35$ s,阻尼比取0.035,其水平地震影响系数应乘以阻尼修正系数 η 。则其反应谱曲线如表1-1所示。

表1-1 反应谱曲线

频率/Hz	自振周期/s	水平地震影响系数 α
0.98	1.02	0.214 180 457
1.02	0.98	0.222 135 971
1.06	0.94	0.230 733 457
1.11	0.9	0.240 055 462
1.16	0.86	0.250 199 468
1.22	0.82	0.261 281 459
1.28	0.78	0.273 440 557
1.35	0.74	0.286 845 132
1.43	0.7	0.301 700 968
1.52	0.66	0.318 262 347
1.61	0.62	0.336 847 329
1.72	0.58	0.357 859 232
1.85	0.54	0.381 817 473
2.00	0.5	0.409 402 904
2.50	0.4	0.501 081 758
2.86	0.35	0.565 422 394
10.00	0.1	0.567 224 587
1000.00	0	0.225

1.2.3 ANSYS 谱分析及振型分解反应谱法

谱是指频率与谱值的曲线,它表征时间历程荷载的频率和强度特征。ANSYS 谱分

析包括 3 种类型：响应谱、动力设计分析方法 DDAM 和功率谱密度 PSD，其中响应谱又分为单点响应谱 SPRS 和多点响应谱 MPRS。反应谱理论是 20 世纪 40 年代美国学者提出的计算地震力的理论，也称为动力法，它考虑了地震时地面的运动特性与结构物自身的动力特性，是当前工程设计应用最为广泛的抗震设计方法。反应谱理论是以单质点体系在实际地震作用下的反应为基础来分析结构反映的方法。

振型分解反应谱法可以考虑多阶振型互相耦合的作用尤其是扭转振型的耦联，如果只是单阶振型，则振型分解反应谱法和底部剪力法应该是一致的。此外，振型分解反应谱法计算出来的地震剪力都是绝对值，没有方向。振型分解反应谱法，也称规范法，适用于大量的工程计算，该法有侧刚和总刚两种计算方法，分别对应侧刚模型和总刚模型，其主要区别是侧刚模型采用的是刚性楼板假定的简化刚度矩阵模型，总刚模型采用的是弹性楼板假定的真实结构模型转化成的刚度矩阵模型。振型分解反应谱法先计算结构的自振振型，选取若干个振型，分别计算各个振型的水平地震作用，将各振型水平地震作用作用于结构上，求其结构内力，最后将各振型的内力进行组合，得到地震作用下的结构内力和变形。其基本原理就是用“规范”反应谱，先求得各振型对应的“最大”地震力，组合后得到结构的组合地震作用。

1.2.4 谱分析操作流程

谱分析之前需进行模态分析。模态分析是一种用来确定结构的振动特性的技术，通过它可以确定自振频率、振型和振型参与系数（即在特定方向上某个振型多大程度地参与了振型）。为方便设计、修改，本算例采用 APDL 语言命令流进行模型的建立及后处理。

模态分析命令流：

```
/SOLU
ANTYPE, MODAL ! 模态分析
MODEOPT, LANB, 20 ! 提取 20 阶模态
MXPAND, 20, , , 1
outpr, all, all,,
/OUT, keyan, vec
SOLVE! 开始求解
FINISH
/POST1
/REPLOT
SET, LIST! 提取频率结果
ESEL, U, TYPE,, 5
```

谱分析命令流：

```
/SOLU
ANTYPE, SPECTR ! 谱分析
SPOPT, SPRS, 20, YES! 单点响应谱参数设置
SVTYP, 1, 1 ! 加速度谱
SED, 1, , ! 设置谱的激励方向
FREQ, 0.98, 1.02, 1.06, 1.11, 1.16, 1.22, 1.28, 1.35, 1.43, 1.52, 1.61,
1.72, 1.85, 2.00, 2.50, 2.86, 10.00, 1000 ! 设置频率
SV, 2.10, 2.18, 2.26, 2.35, 2.45, 2.56, 2.68, 2.81, 2.96, 3.12, 3.30,
3.51,
3.75, 4.02, 4.92, 5.55, 5.56, 2.21 ! 设置相对应的谱值
SOLVE
FINISH
扩展模态命令流:
/SOLU
ANTYPE, MODAL! 扩展模态分析
EXPASS, ON
MXPAND, 20,,, YES, 0.001! 指定模态扩展阶数
SOLVE
FINISH
合并模态:
/SOLU
ANTYPE, SPECTR! 谱分析
CQC, 0.001, DISP! 合并模态方式
SOLVE
FINISH
进入后处理:
/POST1
/INPUT, FILE.MCOM
PLNSOL, U, SUM
```

1.2.5 结果分析

利用 ANSYS 软件,按照上述流程即可求出该算例在地震作用下的频率、位移和应力。本文的主要目的为定性分析钢结构空冷塔在地震作用下的各阶振型和位移。通过 ANSYS 软件提取出本算例的前 20 阶频率(如表 1-2)及前 4 阶在地震作用下位移(如图 1-2~图 1-5)。

表 1-2 本算例的前 20 阶频率

阶数	频率	阶数	频率	阶数	频率	阶数	频率
1	1.455 1	6	1.736 5	11	1.864 0	16	1.919 0
2	1.455 1	7	1.770 9	12	1.864 1	17	2.011 6
3	1.470 0	8	1.771 2	13	1.881 6	18	2.011 7
4	1.470 0	9	1.782 0	14	1.881 8	19	2.040 4
5	1.735 3	10	1.782 2	15	1.917 7	20	2.042 0

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB=1
FREQ=1.455
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.001993
SMX=.001993

ANSYS
jun 14 2012
15:51:39
PLOT NO. 46

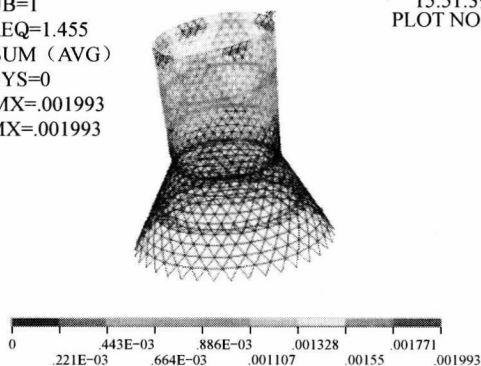


图 1-2 第 1 阶位移

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB=2
FREQ=1.455
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.002017
SMX=.002017

ANSYS
jun 14 2012
15:48:51
PLOT NO. 1

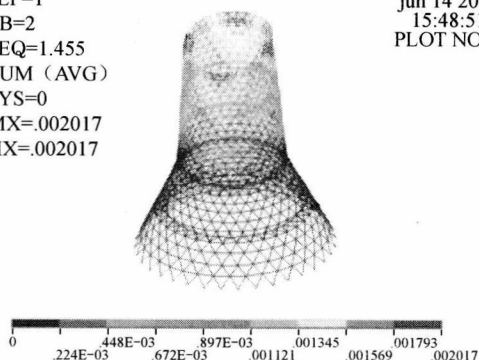


图 1-3 第 2 阶位移

如图 1-2 ~ 图 1-5 所示, 在给定地震作用下, 本算例钢结构空冷塔前 2 阶表现为上部圆柱体局部变形即出风口处在 x 方向及 y 方向的挤压; 第 3、4 阶表现为结构上部圆柱体绕 x 、 y 轴整体平动; 参考其他阶位移图发现结构下部锥体部分在地震作用下基本不产生位移。提取各阶振型质量参与系数进行分析, 本算例在地震作用下振型质量

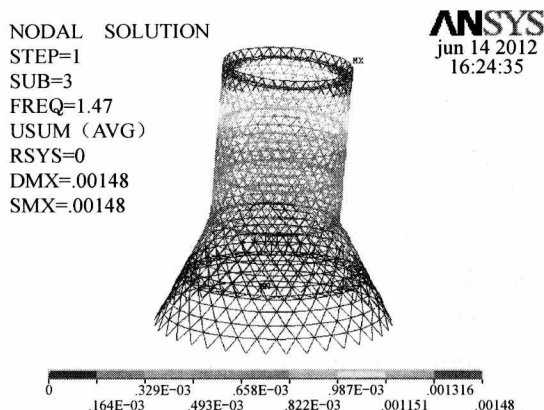


图 1-4 第 3 阶位移

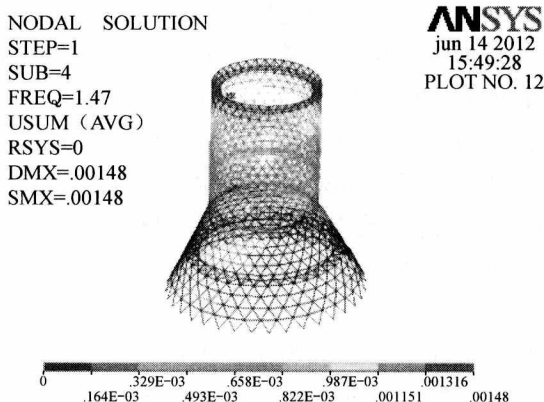


图 1-5 第 4 阶位移

参与系数过低, 仅为 40%。导致这一现象的原因可能有: ①结构上下部分刚度相差较大, 使得下部结构基本不参与振型; ②上部结构加强圈设置不合理。

按照此思路对结构方案进行修改。首先, 修改结构加强圈部分的杆件。由于结构整体刚度下大上小, 采取增大上部加强圈杆件截面积和长度来增大上部结构整体刚度, 同时在不影响结构安全的前提下, 降低下部结构加强圈截面积, 加大下部结构加强圈距离。按此调整后经过 ANSYS 软件计算, 读取处理后的数据, 发现结构前 2 阶振型为结构上部绕 x 、 y 轴整体平动, 结构振型质量参与系数也增加到 53% 左右。其次, 调整空冷塔下部锥体倾斜角度。将原结构锥体倾斜角度由 26° 减小到合适角度 (混凝土空冷塔采用双曲线结构形式, 下部结构锥体倾斜角度为 17° 左右), 对调整后的模型进行计算。提取处理后的结果, 发现按此方案修改后的空冷塔在地震作用下的振型参与系数大大提高, 结构整体刚度保持一致, 基本满足 GB 50191—1993《构筑物抗震设计规范》的要求。