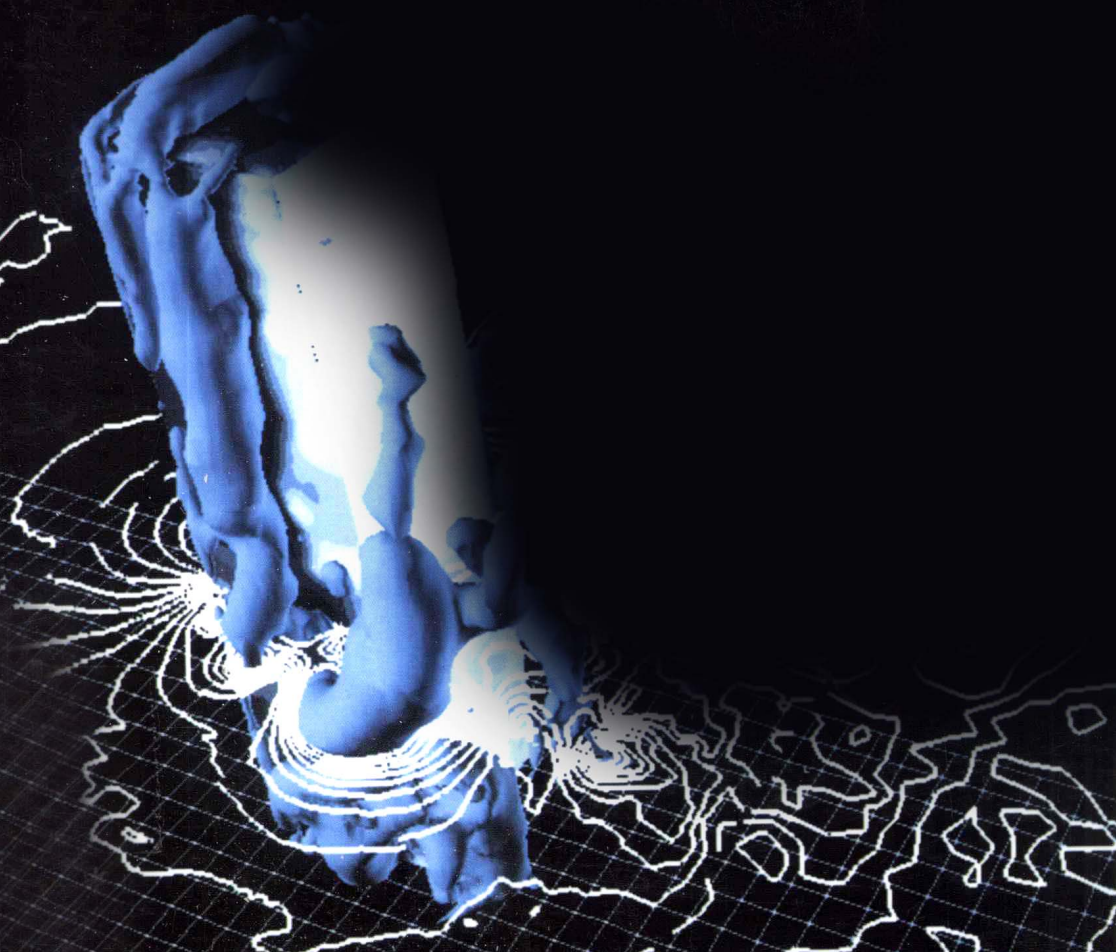


建筑风荷载 流体计算指南

Guide for numerical prediction
of wind loads on buildings

[日] 日本建筑学会 编

孙 瑛 孙晓颖 曹曙阳 译

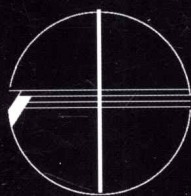


中国建筑工业出版社

责任编辑: 刘瑞霞 刘文昕
封面设计: 付金红

本书介绍了用于建筑物抗风设计的一些最新流体计算方法, 共分为8章和6个附录, 主要内容包括流体计算的基础知识(第2章), 利用流体计算确定设计风速、风压、风力、风振响应及设计风荷载的方法与要点(第3~6章), 以及具体的工程应用算例(第7章)。附录中给出了流体计算基础知识和计算方法的补充, 此外还针对计算机的性能及相关参考书进行了介绍。上述内容能指导相关人员正确使用计算流体技术用于工程设计。

本书章节简繁有致, 注重基本概念和基本公式的阐述, 对相关计算方法和操作步骤讲解详尽、工程背景深厚。本书可作为建筑抗风设计和风工程研究的参考书, 可供设计者、相关科研和技术人员参考, 也可作为高等院校土木工程专业高年级学生或研究生的教材。



经销单位: 各地新华书店、建筑书店
网络销售: 本社网址 <http://www.cabp.com.cn>
网上书店 <http://www.china-building.com.cn>
博库书城 <http://www.bookuu.com>
图书销售分类: 建筑结构与岩土工程 (S10)

ISBN 978-7-112-12368-1



9 787112 123681 >

(19627)定价: 48.00 元

建筑风荷载流体计算指南

**Guide for numerical prediction of
wind loads on buildings**

[日] 日本建筑学会 编
孙 瑛 孙晓颖 曹曙阳 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2008-5854 号

图书在版编目(CIP)数据

建筑风荷载流体计算指南/[日] 日本建筑学会编；孙瑛等译.

北京：中国建筑工业出版社，2010.10

ISBN 978-7-112-12368-1

I. ①建… II. ①日… ②孙… III. ①计算流体力学应用-建筑物-抗风结构-结构设计 IV. ①TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 160820 号

Kenchikubutsu no Taifuu Sekkei no tame no Ryutai Keisan Guide Book
Copyright©2005 by Architectural Institute of Japan
Chinese translation rights in simplified characters arranged with Architectural
Institute of Japan through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo
本书由日本建筑学会授权翻译出版

责任编辑：刘瑞霞 刘文昕

责任设计：肖 剑

责任校对：马 赛 赵 颖

建筑风荷载流体计算指南

Guide for numerical prediction of wind loads on buildings

[日] 日本建筑学会 编

孙 瑛 孙晓颖 曹曙阳 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：14 插页：2 字数：350 千字

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月第一次印刷

定价：48.00 元

ISBN 978-7-112-12368-1
(19627)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

(邮政编码 100037)

中文版自序

本书是日本建筑学会风荷载委员会为了公开在计算流体力学(Computational Fluid Dynamics; CFD)方面的研究成果而在 2005 年 10 月出版发行的。本书主要介绍了当时风工程领域的最新流体计算方法。它着眼于研究将 CFD 方法用于确定结构风荷载的适用性,对以结构抗风性能为研究对象时必须具有的预测精度以及为了确保预测精度而采取的方法进行了详细的介绍。出版这本书的目的是为了促进 CFD 的实用化,并且在一开始着手准备时也认真讨论了这本书的定位,即是写成一本框架式的指导书还是写成工程设计人员能够直接使用的对数值模拟各个环节提出明确步骤的指导书。最后该书被定位为框架式的指导书,在说明 CFD 用于某些领域研究方向的同时,介绍 CFD 技术的背景、方法以及它们的物理意义,使一般工程技术人员也能很好地理解并加以运用。为此,本书中涉及的建筑物算例都针对简单的外形,如三维柱状体。在该书日文版出版之后,日本建筑学会风荷载委员会又将研究内容扩展到实际结构的抗风设计中,以实际结构为 CFD 抗风设计计算的对象,并提出在 CFD 实用化过程中存在的问题并研究对策。利用 CFD 进行抗风设计计算时,可以不受目前常用的以风洞实验技术为基础的抗风设计方法的约束。为了建立基于 CFD 的抗风设计方法,需要从计算技术的角度研究各个抗风设计阶段中各种参数的设置方法,现在正在做这方面的工作。

随着 CFD 商用软件在世界各国的普及,设计人员可随意地采用 CFD 用于建筑物抗风设计。当然,通过 CFD 计算肯定会得到一个数值结果,且该结果有可能没经过充分考察就被应用于抗风设计。但是,对于结构抗风设计,这是一项随时会关系到人命安全的工作,设计人员有责任考虑到各个环节的危险性。因此,虽说 CFD 软件确实使得人人都可以较容易地进行抗风设计计算,但应用 CFD 于抗风设计其实是一柄双刃剑,应该慎重。为了将来能够使 CFD 成为一项实用的技术而得到应用,在现阶段进行大量的试用性计算为正确的抗风设计计算积累经验 and 数据,这是必要的。就这一点而言,目前的当务之急是向社会提供一本可以应用于实际工程的 CFD 抗风设计指导书。

近年中国正在进行大规模的土木工程建设。在这个背景下,不管是前期初步设计还是最终的施工图设计,需要进行抗风设计的工程项目应该很多。为了制定中国自己的用于实际工程的指导书,当务之急是要验证 CFD 计算结果。有许多情况要利用 CFD 进行建筑物的抗风设计,在这种社会需求的大环境下,提供一些用于判断安全性的参考意见是非常重要的,因此从这一点上来说,本书的中文翻译和出版应该是甚得天时。本书如果能在如何

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及目标	1
1.1.1 CFD 技术的现状	1
1.1.2 CFD 的用途	3
1.1.3 本书的预期目标	4
1.2 CFD 在抗风设计中的作用	4
1.2.1 风洞实验与 CFD 技术	4
1.2.2 抗风设计与 CFD 应用	5
1.3 流体计算中的数学模型	6
1.4 本书的基本方针	7
1.4.1 CFD 技术应用的关键问题	7
1.4.2 本书的主要内容	8
第 2 章 流体计算的基础知识	10
2.1 前言	10
2.2 离散化方法	10
2.2.1 空间离散化	10
2.2.2 变量设置	18
2.3 计算网格	19
2.3.1 结构化网格及非结构化网格	20
2.3.2 正交网格及边界适应网格	20
2.3.3 混合网格	21
2.4 湍流的模拟	22
2.4.1 雷诺平均湍流模型	22
2.4.2 大涡模拟 (LES)	26
2.4.3 上游化处理	29
2.5 计算算法	30
2.5.1 压力求解算法	30
2.5.2 时间积分方法	31
2.5.3 定常计算方法	33
2.5.4 边界条件	33

第3章 大气边界层风特性预测	38
3.1 前言	38
3.1.1 大气边界层内的气流特性	38
3.2 粗糙地面上的气流	40
3.2.1 基于气流特性的粗糙度模拟	40
3.2.2 基于边界条件的粗糙度模拟	41
3.2.3 计算算例	43
3.3 局部地形的影响	46
3.3.1 算例说明	46
3.3.2 计算模型与计算条件	46
3.3.3 计算条件的影响	49
3.3.4 计算结果分析	51
3.3.5 计算结果处理	54
3.4 城市大气边界层流场的模拟	56
3.4.1 城市大气边界层流场	56
3.4.2 通过湍流模型模拟粗糙元	57
3.4.3 粗糙元参数	59
3.4.4 计算算例	61
第4章 风压、风力的预测	68
4.1 前言	68
4.1.1 计算方法	68
4.1.2 算例说明	69
4.1.3 风压系数	70
4.1.4 风力系数	70
4.2 基于 RANS 模型的风压、风力预测	71
4.2.1 计算条件	71
4.2.2 计算参数设置	73
4.2.3 计算结果的验证	77
4.3 基于 LES 模型的风压、风力预测	82
4.3.1 计算条件	83
4.3.2 计算参数设置	86
4.3.3 计算结果的验证	88
第5章 风振响应的预测	97
5.1 前言	97

5.2 流固耦合分析方法及其评价	97
5.2.1 流固耦合求解方法	97
5.2.2 流体基础方程式的转换	98
5.2.3 边界条件的设定	99
5.2.4 动网格的处理方法	100
5.2.5 无量纲参数	100
5.2.6 计算算例	101
5.3 高层建筑的风振响应	103
5.3.1 计算模型及计算方法	104
5.3.2 基于脉动风力的风振响应分析	108
5.3.3 基于流固耦合的风振响应分析	110
5.3.4 小结	111
5.4 不同截面建筑的气弹失稳	112
5.4.1 计算方法	112
5.4.2 二维计算中湍流模型的效果	114
5.4.3 静止时下不同边长比矩形截面的气动力特性	115
5.4.4 边长比为 2 及 4 的矩形截面上的平动涡激振及驰振	117
5.4.5 边长比为 2 的矩形截面上的扭转涡激振、扭转颤振	119
5.4.6 边长比 5~20 矩形截面的颤振分析	120
5.4.7 小结	123
5.5 动力参数对气动失稳振动的影响	123
5.5.1 采用上游化方法进行流体计算	124
5.5.2 边长比为 2 的长方形柱的气动失稳振动响应	125
5.6 多个建筑物的计算方法	127
第 6 章 设计风荷载的确定	133
6.1 前言	133
6.2 风荷载计算流程	134
6.2.1 设计风速的确定	134
6.2.2 围护结构风荷载的确定	137
6.2.3 主体结构风荷载的确定	138
6.2.4 风致振动下的舒适性评估	139
6.3 风荷载的计算	139
6.3.1 基本条件	139
6.3.2 计算方法	142
6.3.3 计算结果的比较	143

6.3.4 高层建筑风致振动下的舒适度	150
6.4 建筑抗风设计中 CFD 技术的应用	152
6.5 小结	153

第 7 章 计算算例	155
7.1 前言	155
7.2 城市街区设计风剖面的预测	155
7.2.1 算例说明	155
7.2.2 计算对象	156
7.2.3 计算方法	157
7.2.4 计算结果	157
7.2.5 小结	160
7.3 局部地形的影响	160
7.3.1 算例说明	160
7.3.2 地形	160
7.3.3 计算方法	160
7.3.4 计算结果	162
7.3.5 小结	163
7.4 穹顶屋盖的风压系数	163
7.4.1 算例说明	163
7.4.2 计算对象	164
7.4.3 计算方法	164
7.4.4 计算结果	165
7.4.5 小结	168
7.5 ㄣ字形平面建筑物气动特性研究	168
7.5.1 算例说明	168
7.5.2 计算对象	169
7.5.3 计算方法	169
7.5.4 计算结果	171
7.5.5 小结	172
7.6 建筑断面选型	173
7.6.1 算例说明	173
7.6.2 计算对象	173
7.6.3 计算方法	173
7.6.4 计算结果	175
7.6.5 气动失稳的探讨	177

7.6.6 小结	178
第 8 章 结语	180
附录 A RANS 模型的改进	183
附录 B 来流脉动风的生成	187
B.1 来流脉动风的必要性	187
B.2 基于随机理论的来流脉动风的生成	187
B.3 基于流体计算的来流脉动风的生成	189
B.4 输入来流脉动风时的注意点	191
附录 C 移动边界的处理	195
C.1 前言	195
C.2 以往的数值计算方法	196
C.3 采用一般坐标系的方法	196
C.4 几何形状守恒原则	198
附录 D 响应解析法	201
附录 E 近期个人计算机性能介绍	205
E.1 前言	205
E.2 单机性能	205
E.3 PC 群性能	205
附录 F 与 CFD 相关的参考书	208
F.1 前言	208
F.2 CFD 的解析方法	208
F.3 湍流的处理	208
F.4 计算网格的生成与可视化	208

第 1 章 绪 论

1.1 背景及目标

1.1.1 CFD 技术的现状

计算流体力学即 Computational Fluid Dynamics(CFD), 是用计算机来近似模拟流动现象并获得由流体产生的作用力的一种技术, 到目前为止这一技术并不仅仅局限于建筑领域的应用, 在航空、机械、气象、土木等方面都有广泛应用。但在不同领域会有不同的计算问题, 因此研究目的也不同。

从建筑抗风设计或更广一些的角度来看风工程学科近年来在计算流体技术方面取得的进展, 可以概括为以下几点:

- a) 可以考虑来流中的湍流特性;
- b) 与湍流相对应的湍流模型有所发展, 针对复杂分离流、强非定常性旋涡等流动现象的模型也逐渐形成;
- c) 使用一般坐标系进行计算的技术正在进步, 避免了复杂地形中精度衰退的计算问题。

于是, 针对放置于湍流状态与自然风相同的流场中的形状较复杂的建筑物, 本文对其表面作用的风压、风力, 及风致振动响应的基础计算技术进行了总结。如果将这些基础技术进行综合应用的话, 就可以从实用角度出发充分考虑在建筑物抗风设计中利用计算流体技术的可能性。

迄今为止, 流体计算的算例大多与基础的流体力学现象相关, 其中也有与抗风设计相关的模拟结果, 具体情况将在下文中阐述。与抗风设计相关的物理量包括基本风速、设计风速、风压、风力及响应等。下面以上述物理量为目标, 对流体计算时的合理性、妥当性及预测精度的研究现状进行阐述。

基本风速是由强风的发生概率来确定的, 一般是根据气象局的统计数据或基于蒙特卡罗法等进行台风模拟来求得的。流体计算适用于在中尺度水平上计算各地点的风速, 但是由于必须是统计上的估计值, 需要进行多次计算, 因此这种计算是不现实的。

其次, 到目前为止设计风速的流体计算结果较为理想。设计风速与基本风速相对应, 是受各地局部地形影响的用于设计的风速, 根据地面粗糙度及地形起伏来确定的。例如, 就竖直风剖面而言, 是由与各种粗糙度相对应的边界层湍流特性决定的。图 1.1.1 及图 1.1.2 给出了城市内地面附近的风流动状况, 根据城市内已建建筑的相关信息, 对建筑物逐个进行数值建模可以再现建筑周围的流场情况。为此, 可以求得不同场所的竖直风剖面。此外, 受复杂地形影响而产生的强风作用, 不同于简单形状的丘陵地, 需要考虑在峭壁上发生分离及地面

粗糙度等情况，这些问题到目前为止用数值模拟还很难实现，但是随着计算机技术及湍流模拟技术的发展，可通过流体计算得到较高精度的解(详见第 3 章)。与此同时，对实际地形的应用也增多，可提供对设计有用的数据(详见第 7 章)。

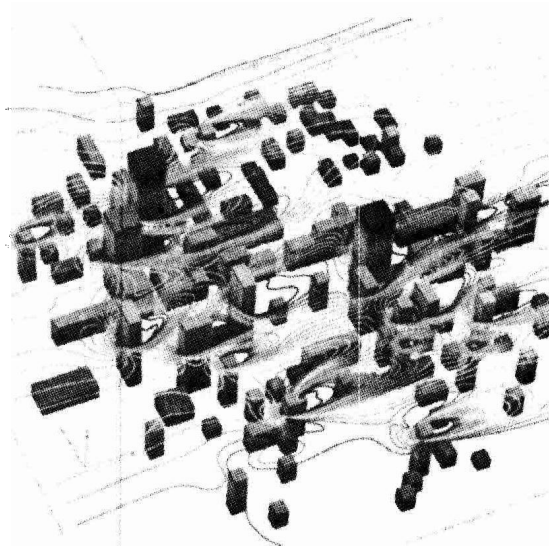
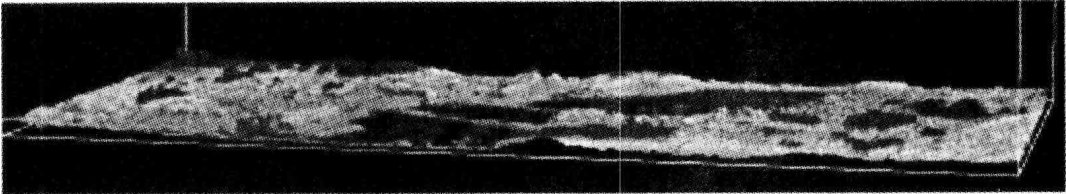
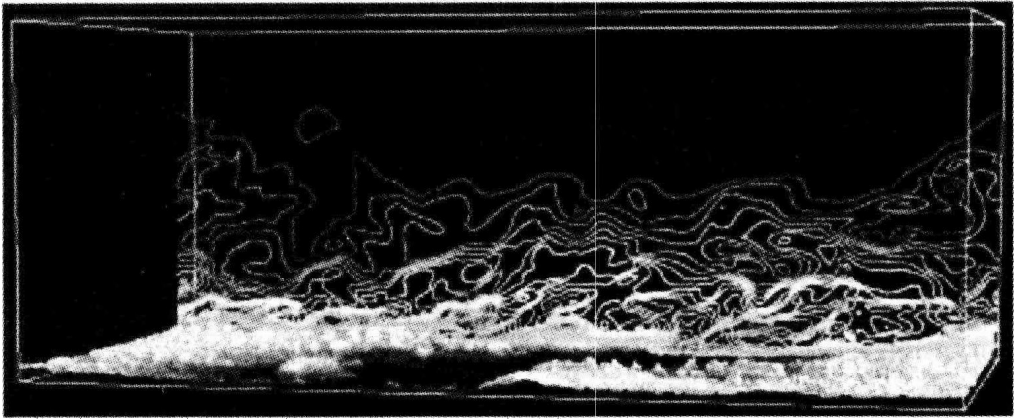


图 1.1.1 高层建筑群周围的风流场(风速等值线图)



(a)



(b)

图 1.1.2 地形起伏的城市风流场

(a)城市的计算模型(地面粗糙度：用建筑及植被来表现，精度为 2m)

(b)地面附近的风流场(瞬时涡结构)

首先以圆柱或方柱等基本形状为研究对象,来研究利用流体计算预测风压、风力的有效性,将流体计算中钝体绕流现象及作用在物体表面的流体力的解析精度作为评价指标。其次,对放置在均匀流场中的物体进行了数值计算,如果分辨率足够高,不仅可以得到流体力的平均值,连脉动值也可以有较高的精度。在具有不同竖直风剖面的边界层湍流作用下,对棱柱形建筑的数值模拟结果进行了研究,使得湍流模拟技术得到提炼,进而获得高阶统计量(空间相关)的预测结果,同时也可以得到随时间变化的风压、风力的谱特性及极值(详见第4章)。

关于振动响应,在流体计算中多按流体力学中的气动弹性问题来处理。即在风速相对较低的情况下,一般由脉动风力推算振动响应,考虑结构振动影响的计算还较少。然而,假如要从抗风设计的角度出发考虑气动衰减的话,就必须通过流体计算考虑风与建筑物间的相互耦合作用。虽然以往关于振动响应方面的研究成果基本上都是针对二维棱柱这一基本形状开展的,但在计算非定常气动力、涡激振动响应或非定常振动响应等方面都获得较高的预测精度。此外,对于最近进行的三维棱柱的流体计算,在考虑振型的基础上,探讨随着风速的增加是否存在附加气动力及其对响应的影响(详见第5章)。

1.1.2 CFD 的用途

前文概述了风工程领域中的数值模拟现状,此处参考在其他领域流体计算基本技术的精度及发展潜力,展望一下在不久的将来抗风设计中可用 CFD 解决的问题。

回顾一下计算流体技术的发展历史,当模拟高雷诺数下的实际流场时,如何设置和考虑极小分子黏性效果是非常重要的研究课题。为此对湍流现象进行了模型化,并导入湍流黏性,或在保证计算稳定性的基础上采用具有高阶精度的迎风差分法。两者都需要有充足的计算机资源,因此降低计算量成为技术焦点。尽管做了努力,偶尔也会由于精度不够而无法得到合理的解。最近,随着计算机资源的丰富,可以进行以往所不可能的模型化处理,并注重数值计算的离散化技术,从而能确保达到很高的精度。用大涡(Large Eddy Simulation, LES)模型对雷诺数为 3900 的圆柱绕流进行数值模拟²⁾,将尾流区的流场结果与实验数据进行详细比较,结果表明 CFD 不仅能很好地模拟平均流,连分离区的湍流也能得到较好的预测。采用 LES 仅对小尺度湍流进行建模,可以避免导入不合理的湍流模型,对数值模拟误差进行合理估计进而实现离散化,以确保结果中包含确定风荷载所必需的非定常成分,并得到可信度较高的结果。

此外,从更实用的角度来看,CFD 可对任意形状进行模拟,其数值方法的精度也有所提高。目前为止,边界由曲面构成时,虽然主要采用一般坐标系展开方法,但是若考虑守恒性,仍可以得到较高精度的解。最近,建筑物向更柔更复杂的方向发展,在采用足够细小的网格进行离散化的前提下,可直接用笛卡儿坐标系,且为了不使解的偏差变大,可采用浸入边界法(Immersed Boundary)来实现(图 1.1.3)³⁾。不管对任意形状作何处理,都要注意精度的问题,对实际地形或形状复杂的建筑物周围流场进行模拟,从理论上说是可以实现的。

如果沿着计算流体技术的现状继续发展,在抗风设计中可以对城市中的设计风速进行预测,并基于此对一般低、高层建筑物上的风压、风力时程进行估算,此外还可对受风荷载影

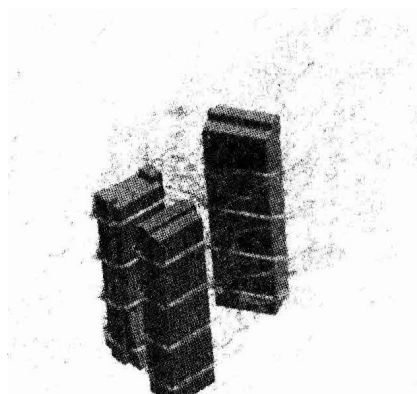
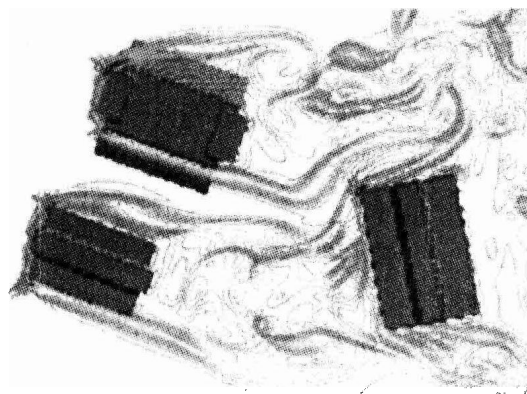


图 1.1.3 多个高层建筑物周围的风流场(基于笛卡儿坐标系的计算)³⁾

响较大的塔式结构、大跨空间结构等进行风振响应计算，并对振动过程中出现的气动衰减现象或非定常振动时的负阻尼力进行研究，具体问题在此之前已经提及，用 CFD 评价抗风性能所必须解决的技术问题还相当多。即便如此，目前用 CFD 技术仍可实现对复杂地形上强风特性、城市建筑群地面附近湍流结构，及大范围地域上风速剖面的数值预测。除此之外，利用 CFD 技术对强风作用下随时空变化较大的建筑单体表面气动力进行模拟，目前只对棱柱体等简单形状可达到实用化，对形状较为复杂的建筑，若能够解决前面所述的技术问题，那么在不远的将来也可实现对风荷载的合理评估。

1.1.3 本书的预期目标

由前文可见，目前 CFD 的技术水平，可实现对简单形状建筑表面风荷载预测的实用化。此外，对于实际形状复杂的建筑物，其研究对象本身是个问题，如果选定适当的计算方法，也可以进行预测。但是，由于计算量很大，如果没有高性能计算机，对设计者而言，还是无法实现。最近随着并行计算技术的迅速发展，及非主流 CPU 价格的急剧下滑，在不久的将来是能在较广范围内实现大量计算的。

本书首先设想在不远的将来 CFD 技术所能达到的水平，将现有技术提供给设计者、技术人员用于建筑物抗风设计，以此为目标，同时强调流体计算原理使其普及，并与风洞实验结果进行对比，来证明用流体计算进行预测的有效性，给出对现有抗风设计有用的方法，以便将来为提出新的基于 CFD 技术的抗风设计方法构筑平台。

1.2 CFD 在抗风设计中的作用

1.2.1 风洞实验与 CFD 技术

CFD 可以看成是利用计算机模拟生成一个假想的风洞，又称数值风洞。但是，其特征与真实的风洞不完全一致。通过流体计算求得的风工程的物理量，如果数据的可信度高，则可

用于建筑物的抗风设计,这将对抗风设计合理化有显著的推进作用。为什么这么说,因为由CFD计算得到的信息与风洞实验不同,它是以流场整体为对象来进行计算的,而且常常是一定的,即使不进行特别处理也能得到解析域全体或建筑物周围某个位置的结果,还有一些计算方法能同时得到时程结果,如风压及风速时程,如果能适当地加以应用就能直接再现强风中建筑物的振动特性。此时,利用CFD对风荷载进行估算的方法与风洞实验有所不同,抗风设计也将根据具体情况提出新的考虑方法。

目前日本建筑学会发行的荷载指南^①,对几种建筑物的风荷载计算提供指导。而对于特殊的非常规建筑物,基本是通过风洞实验来确定风荷载。此外,荷载指南中给定的各荷载也多是基于风洞实验数据得到的。即现在的抗风设计方法,与风洞实验技术有着十分密切的关系。另一方面,基于CFD得到数据,其过程繁琐,与在风洞实验中直接测量必定不同,可利用的数据也不同。此时,若能实现CFD技术实用化,抗风设计方法也可能会改变,没有必要被目前的以风洞实验预测技术为主的抗风设计方法所束缚。

设想将来CFD技术得以发展后,在计算机高性能化的情况下,将无需配备特殊的设备,这点是非常重要的。正如现在的结构分析,可以用计算机进行解析,这是以往所不能想象的情形。如果通过CFD技术能得到可信的风速、风压值,再加上计算机造价不高的话,就可以对实际的复杂形状建筑物并考虑周边环境或城市内周边建筑的配备,以及地形影响等多种情况进行流体计算,这种风荷载的确定方法被认为是合理的。同时,若不需要特别的设备,将对技术的普及有很大的促进作用。与此对应,进行风洞实验时模型制作的麻烦,或随着测点数增加而引起的时间和劳力的增加等,这些都是采用CFD技术可避免的。

1.2.2 抗风设计与CFD应用

CFD在抗风设计中的应用,主要有以下两方面:

- a) 若抗风设计方法已确定,CFD计算只需提供基本的数据信息。
- b) 针对建筑物的实际情况,通过CFD计算得到设计中所需的各物理量,并给出结果。

与先前所述的风洞实验相同,在对上述两种情况进行流体计算时,所得到的结果也会有所不同。即这两种情况都是以计算结果的可信度(解的稳定性)作为衡量CFD应用的重要指标,但各自又有不同的含义。对于前者,只通过一个算例就能得到可信度较高的结果的话,可认为比较理想,这时对该问题可以不惜成本进行计算,并且只要进行一次就可以了。此时,通常可通过充分对比和考察得到可信的解,因此只要能控制解的偏差,就不需要特别关注该指标。而对于后者,在抗风设计中可使用一般的技术来实现,这些方法未必相同,计算结果也自然存在离散性。究其原因在于离散化、算法、边界条件、物理模型等方面的不同,必须弄清这些方面对于结果的影响,为确保具有足够的解的稳定性必须彻底探讨CFD技术的一些基础理论。综上,有必要明确CFD技术在抗风设计应用中的位置。

针对后者,应使CFD计算流程化,对建筑物进行抗风设计时,每次都可以按照相同的流程来预测风荷载,在考虑实际建筑物时,对抗风设计中的粗糙度划分、风压系数、风力系数等无法马上确定的物理量,没有必要进行硬性分类。

1.3 流体计算中的数学模型

在进行流体计算时,确定流动现象(即风)的数学模型是必要的,而流体计算中根据抗风设计所需的物理量又可采用不同的模型。最初的模型选择,可根据计算为定常还是非定常来确定。结构抗风设计是以自然风为研究对象,其在流体力学中表现为湍流状态,因此需要确定模拟湍流的状态到什么程度,也就是说,要考虑是不是直接以随时空变化的脉动风为模拟对象,各湍流统计量需精确到什么程度,是仅时间平均值就足够了还是需要精确到脉动值等。根据处理方法不同,用来描述风的相关流体力学方程也就不同。描述流体运动的微分方程具有强非线性,因此用计算机进行数值计算时,无法简单地进行求解。即使直接进行离散化求解,通常也不能确保数值计算的稳定性,计算也会发散。进行湍流计算时,湍流能量是由低频向高频转移,要考虑如何处理高频段细微的变化流场。在实际的物理现象中,主要是分子黏性起能量消散作用,要模拟分子黏性在较高频段的能量消散效果,特别是在模拟高雷诺数的风场时,对计算网格的分辨率要求很高,计算量也迅速增大。这种计算方法称为直接求解法(Direct Numerical Simulation, DNS),利用现在的计算机用该方法进行模拟时,只能针对低雷诺数的流动现象。因此,在现在的流体计算方法中,针对高频能量效果的问题又提出了各种方案。以往数值计算技术通常采用上游化方法,通过增加被称为数值黏性的附加黏性效果,来确保计算的稳定性。采用这种方法时,高频段的能量耗散不是物理性的原因导致的,有时会发生太多的湍流能量被耗散的现象。为此在实际应用中,通常要设置比所需频率要求更高的分辨率来保证实际的分辨率要求。在计算静止或振动物体周围的大尺度涡的流动时,或只需确定流场的主要结构时,采用这种方法,分辨率要求比较容易满足,同时该方法又能得到非定常解,因而是一种行之有效的方法经常被采用。但是,即使是建筑周围的流场,由于其脉动风压在跨度方向具有相关性,受湍流尺度的影响很微妙,因此要确保足够的计算精度是很困难的,应基于物理研究结果对湍流进行模型化。

湍流模型不是通过使用分子黏性来处理高频段处的能量耗散而是使用湍流黏性来处理,因此根据湍流黏性的表现形式而采取各种不同方法。在大的层面上,根据湍流统计量的辅助方程式联合求解得到统计量,以此来估计湍流的效果,在计算中可分为两种方式,一种是雷诺平均湍流模型(Reynolds Averaged Navier-Stokes model, RANS),另一种是与DNS的概念基本相同的大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES),该方法对某些小尺度湍流运动进行模型化从而在运动方程式中考虑一般化的涡黏性效果,相对于DNS,LES的计算量大大减小。RANS针对不同流动特性而进行模型化,其辅助方程包含的联立微分方程式各有不同,有时也包含复杂形式,但是如果能够构造出合理表现流场所有特性的模型,一般能求得定常解,相比于DNS或LES,其计算量小。但RANS必须进行许多参数的条件设定,以便在实际计算中获得有效方法,特别是只需计算平均值或标准差就足够时,存在如何协调处理的计算技巧。另一方面,LES相对于一般的模型化处理并不复杂,且普通的计算参数也不多,方程式的处理相对简单,但这是以三维非定常计算为前提的,计算量很大,要求解概率统计量就必

须要很长的时间序列数据,因此这是一项很艰巨的工作。但是,由这些时间序列数据可直接获得风荷载的谱值或峰值,这在抗风设计中是包含求解域内全面信息的重要数据,其广泛性和应用潜力很大。此外,LES可对工程中重要的脉动场直接进行计算,对各种流场的模型依赖性低,没有必要考虑湍流模型是否具备流场特性。

1.4 本书的基本方针

本书的基本方针是由CFD的专家向风工程相关的技术人员及结构设计者介绍CFD用于抗风设计时的一些方法。特别是针对建筑物的结构设计者,尽可能给出易懂的内容及方法。为此,为了在建筑抗风设计领域更好地应用CFD技术,结合在建筑物抗风设计中合理应用CFD技术的具体算例进行详细说明,使其得以普及。同时对1.4.1节中的问题进行思考,给出基于现有抗风设计方法合理应用CFD技术的指南,从而获得有用数据。

此外,有了这些CFD技术的说明,与风工程相关的技术人员及结构设计人员在进行CFD计算时,应该在以下几个方面进行设定,给出风荷载预测的流程。

进行流体计算,所必须设定的内容:

从问题出发确定计算模型;

计算方法(离散化方法)的选择;

湍流模型的选择;

计算模型(计算域、网格系、网格数等)的生成;

边界条件的设定;

计算结果的内容及其输出方法的确定;

根据计算机来估计计算量;

结果的分析(物理解释、精度验证);

风荷载的评价(对风荷载相关的数据的评价)。

1.4.1 CFD技术应用的关键问题

在建筑抗风设计中要探讨的内容包括设计风速、围护结构/主体结构的风荷载、风致振动下的房屋舒适度、气动失稳振动、构件疲劳损伤等多个方面。在讨论这些问题时,需要了解建筑物周围的流场及作用在墙面、屋面上的风压特性,目前一般都采用风洞实验来获得。在风洞实验方面,积累了非常多的研究成果,可以保证有一定的可信度,风洞实验指南也已经完成。

另一方面,随着CFD方法的不断完善,已频繁在室内气流、建筑风、大气耗散、都市风气候等环境领域得以应用。但是,在对建筑物风荷载及风致振动的预测方面,对于作为基本数据的风压,还不容易对其预测精度进行评价,现在的设计还多采用实验方法。建筑周围的流动,常有以下的一些特征,因此在进行流体计算时,也存在一些问题。为了解决这些问题,要采用高精度且适用性广的计算算法,通过导入湍流模型,避免采用非常细小的计算网