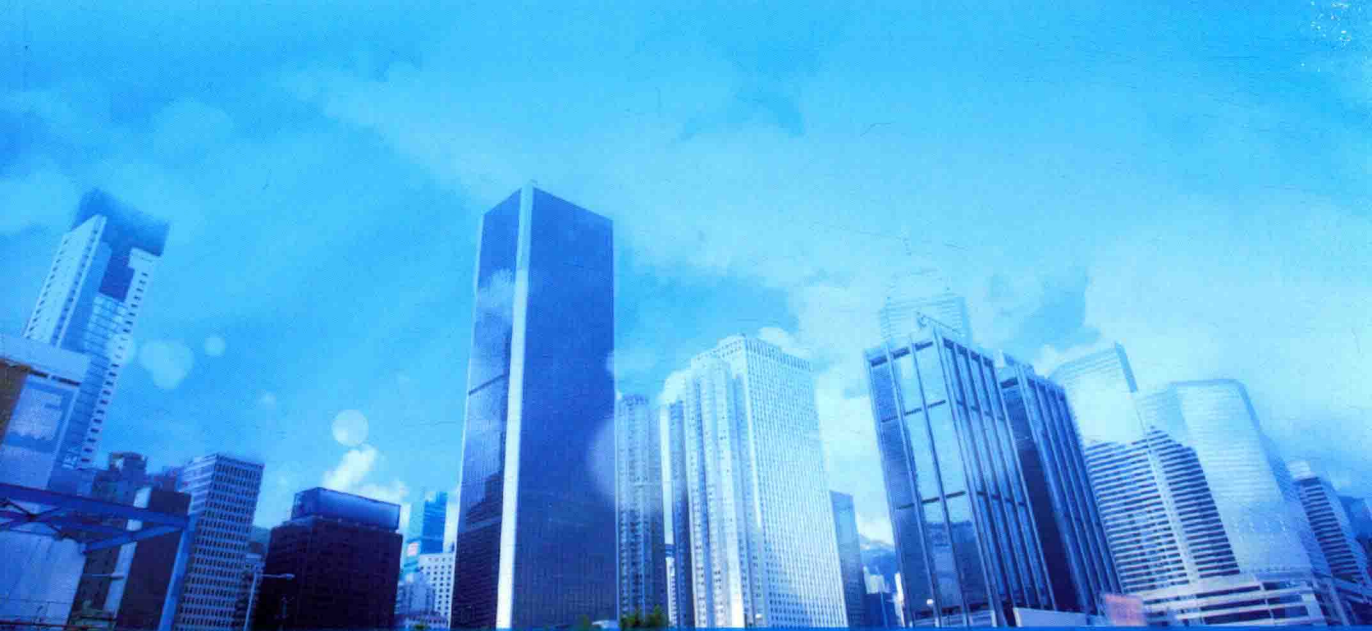




# Diana10.1

## 土木工程有限元分析

柴舜 编著

非外借

 南京大学出版社

# Diana10.1

## 土木工程有限元分析

柴舜 编著



微信扫一扫获取  
本书的.py文件

## 图书在版编目(CIP)数据

Diana10.1 土木工程有限元分析 / 柴舜编著. — 南京: 南京大学出版社, 2018.7

ISBN 978-7-305-20282-7

I. ①D… II. ①柴… III. ①土木工程—有限元分析—应用软件 IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 111586 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 Diana10.1 土木工程有限元分析

编 著 柴 舜

责任编辑 陈兰兰 王南雁 编辑热线 025-83593923

照 排 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 南京大众新科技印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 25.25 字数 611 千

版 次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-20282-7

定 价 78.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

微信服务号: njuyuexue

销售咨询热线: (025)83594756

---

\* 版权所有, 侵权必究

\* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

# 前 言

Diana(Displacement ANAlyzer, 又称作 DIANA, 为统一形式, 本书以 Diana 统称。)是一款同时适用于工程设计单位和科研单位的土木工程有限元非线性分析软件, 于上世纪 70 年代诞生于荷兰计算力学部门。目前 Diana 跨越了 8.1 版到 10.2 版, 其中 Diana10.1 版同时兼具 DianaIE 和 iDiana 的两种 GUI 界面操作和不同语言类型的命令流操作。截至目前为止, 除了软件自带的英文手册之外, 国内尚无相关书籍系统介绍该软件的操作。因此本书以 Diana10.1 软件作为平台, 基于作者熟悉的土木工程研究领域和多年来使用多个不同版本 Diana 经验, 并侧重于当前流行的结构非线性分析, 介绍了该软件的单元类型、材料本构类型、规范类型在 GUI 界面操作中的设置以及 Python 语言的编辑, 以期能为初学者尽快入门这款软件提供一定帮助。为方便读者学习, 在第三章至第五章配有一定数量操作例题和相关 Python 语言的命令流附件。

本书作者长期使用 Diana 软件进行有限元非线性分析, 对该软件的操作有很多学习心得和体会, 这对解决初学者在使用和操作上的疑惑相信会有一定的帮助。正如前文所言, 该软件是一款同时适用于工程设计单位和科研院校的软件, 因此本书不仅适用于工程设计单位的设计人员和科研人员, 同时还适用于从事土木工程、岩土工程和市政工程的相关科研人员, 亦可作为高校教师、博士生、研究生和本科生的软件学习教程。

本书介绍的操作方式均为 Diana10.1 下的 GUI 可视化操作和 Python 命令流语句操作。为方便读者学习, 书中所有附带有命令流语句例题的 Python 语句命令流文件均会在相应的官网上贴出来。其实 Diana 软件是一种适用于诸多领域和诸多方向的软件, 具有非常广阔的应用前景, 绝不仅仅局限于土木工程结构方向的应用。由于作者在热力学分析、水工结构、市政结构和流体结构、岩土和地下结构等其他诸多领域的研究较少, 因此本文的重点在于土木工程的结构方向, 同时偏向于以迭代方法为主的非线性分析计算。也希望相关领域的前辈和专家能够早日撰写出更优质的书籍。

为方便使用 Python 命令流语句完成建模、非线性分析和后处理等一系列操作, 读者可在扉页微信扫一扫获取第三章到第五章部分算例的 Python 语句

命令流.py 文件,请广大读者自行下载学习。

由于编者水平有限,成书时间仓促,书中难免存在错误与缺陷,恳请广大读者批评指正,也欢迎各位 Diana 领域同行共同交流研讨。在此特别感谢上海敦牒代理公司的张辰经理升级这款优质的有限元分析软件,感谢敦牒公司华东区 Diana 负责人贾明杰总工程师和荷兰阿纳姆 Diana 总公司的马桑总工程师,感谢他们在 Diana10.1 软件交流会中对我的指点,正是他们不厌其烦的讲解,以及在使用软件过程中给予的指导,在掌握 Diana10.1 操作过程中给了我许多帮助,使我能够在最短的时间内从 9.4 版 Diana 旧式命令流编辑操作过渡到新版 10.1 版本的 GUI 用户可视化界面操作和 Python 语句命令流编辑操作。同时本书也起着抛砖引玉的效果,希望更多的专家和大师今后能够在 Diana 领域写出理论程度更深、质量水平更佳的著作。

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 前 言 .....                     | I   |
| 第一章 Diana 概述 .....            | 1   |
| 1.1 背景介绍 .....                | 1   |
| 1.2 Diana 软件的主要功能和安装运行 .....  | 3   |
| 1.3 Diana 软件常用单元类型 .....      | 6   |
| 1.4 Diana10.1 文件系统 .....      | 33  |
| 1.5 Diana10.1 图形用户界面 .....    | 35  |
| 1.6 Diana 有限元分析流程 .....       | 40  |
| 1.7 DianaIE Python 语言 .....   | 42  |
| 1.8 Diana 单位 .....            | 44  |
| 第二章 Diana 材料模型和规范简介 .....     | 46  |
| 2.1 Diana 各类材料模型简介 .....      | 46  |
| 2.2 混凝土结构的裂缝模型 .....          | 56  |
| 2.3 钢筋本构模型 .....              | 65  |
| 2.4 Diana 长期性能问题的本构模型介绍 ..... | 69  |
| 2.5 Diana 规范简介 .....          | 72  |
| 第三章 Diana 土木工程非线性建模案例分析 ..... | 81  |
| 3.1 案例一:平面预应力框架非线性分析 .....    | 81  |
| 3.2 案例二:箱梁体外粘贴钢板加固案例 .....    | 98  |
| 3.3 案例三:预应力混凝土连续梁长期性能分析 ..... | 138 |
| 3.4 案例四:平面单元钢筋混凝土梁的裂缝分析 ..... | 160 |
| 3.5 案例五:门式框架 .....            | 175 |
| 3.6 案例六:剪力墙滞回分析 .....         | 197 |
| 3.7 案例七:预应力筋粘结滑移模型 .....      | 225 |
| 3.8 案例八:钢筋混凝土结构非线性动力分析 .....  | 238 |

第四章 水化热反应..... 259

4.1 案例一:管廊节段瞬态水化热分析案例..... 259

4.2 案例二:大体积混凝土水化热开裂指数..... 281

第五章 预制节段拼装构件非线性数值分析..... 316

5.1 案例一:预制拼装混凝土块键齿受剪破坏..... 316

5.2 案例二:预制节段拼装梁阶段性分析..... 332

5.3 案例三:预制节段拼装梁随机场分析案例..... 368

第六章 Diana 不足之处和对后续版本建议 ..... 393

附录 Diana10.1 快捷操作及默认术语 ..... 395

参考文献..... 396

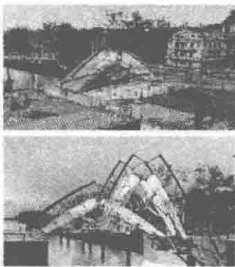
# 第一章 Diana 概述

## 1.1 背景介绍

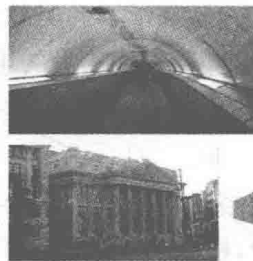
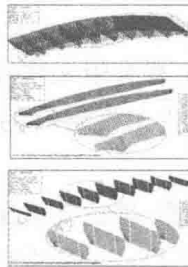
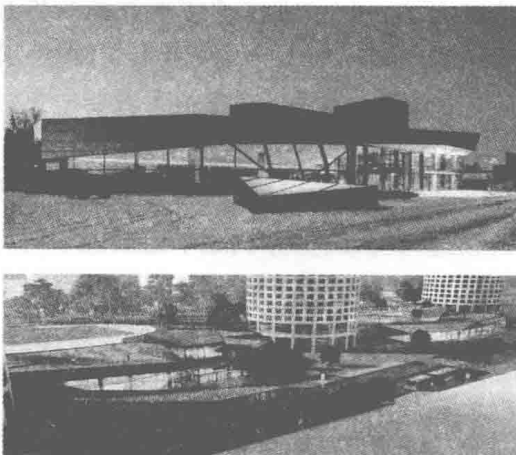
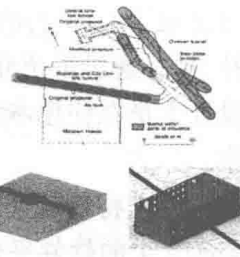
Diana(Displacement ANAlyzer, 又称作 DIANA, 为统一格式, 本书统称为 Diana) 于二十世纪七十年代诞生于荷兰计算力学部门。是一款由 TNO Diana 公司研发, 适用于土木工程各个领域, 性能优异的有限元分析软件。近年来尤其在结构、桥梁、岩土、地下以及桩基等工程领域有着广泛运用。近二十年来, Diana 软件在界面操作、命令流语句的简化、单元库类型与材料本构的丰富等方面经历着不断的发展和完善。相对于国外其他有限元软件而言, Diana 软件因其在钢筋混凝土结构非线性有限元分析中对混凝土结构开裂的数值模拟、水化热模拟、砂土液化、随机场预测以及建筑结构时变性能和抗震等各方面具有良好的模拟效果从而受到了全世界科研人员 and 设计人员的高度重视, 应用越来越广泛。而迄今为止, 国内尚无相关书籍系统介绍此类软件的操作。由于语言关系, 对软件系统自带的英文手册的查阅和学习也成为一部分用户理解和学习此类软件的瓶颈。鉴于此, 作者希望通过本书的编写来填补空缺, 通过系统介绍这款性能优异的土木工程有限元软件, 帮助国内高校科研人员和工程设计人员在使用本书并配合手册学习这款软件时能够有的放矢, 快速掌握该软件的基本操作。

本书的一大特色就是通俗易懂。相对于介绍全面, 理论分析精湛的用户手册而言, 本书基于 Diana10.1 的软件平台, 根据多年使用新旧版本 Diana 的经验基础上, 淡化了大量内容晦涩、难度较深和理解起来较为吃力的有限元基本理论知识部分, 尽量用浅显易懂的语言和简单易懂的阐述方式来说明该软件的学习重点, 这将有助于初学者快速掌握这款软件在建模中的基本操作技能。同时本书对该软件在土木工程相关领域的适用特点给予阐述, 并根据作者多年经验, 结合 Diana9.4 版本的界面操作、命令流操作范例, 将在施工现场所见的一些工程结构进行抽象和简化后建立的模型和近年来国内相关研究热点结合, 编写了一定数量的例题, 对 Diana 软件本构参数的设置和具体操作流程进行了实例展示, 希望能帮助读者快速入门。与此同时, 为使初学者易于理解, 本书在后面提供的部分例题中还附上了对应的 Python 语言的命令流, 相信这些例题和命令流会对读者的学习产生一定的帮助。本书对 DianaIE 软件模块的界面操作进行拆分, 以逐一介绍常用的主要功能作为编写思路, 突出详略和重点之处, 不仅对该软件的总体进行了宏观把握, 还对该软件应该介绍的重点部分进行了较为详细的介绍。本书的第二大特色就是融合作者本人的数值模拟、试验和工程经验编制了相关例题。例题分别在三、四、五三个章节, 其中第三章是采用 Diana 软件对传统土木工程结构建立非线性计算数值模型; 第四章主要是介绍 Diana 的一大特色名片——“水化

热”操作;第五章为国内新兴的预制节段拼装结构,这种结构由于受力特性和结构性状均较为复杂,对几何模型的建立、界面单元和非线性计算各个方面都有着较高的要求,因此该部分将是本书着重介绍的部分,同时也是本书的闪光点之一。本书另外一大闪光点是每一章节的例题除大量采用图形和表格方式介绍 DianaIE 的模块使用及操作以外,大部分例题还附上了 Python 语言命令流,供读者对比学习两种殊途同归的建模方式,以期达到适应不同后缀名称的文件的打开、运行、编辑和保存方式,具备建模的入门水平。本书的第三大特色就是在后面三章的章节例题编写中加入了学习要义,即将每一节模型中具有代表性的四五个经典操作有针对性地提炼出来,放置在每节开头,学习要义本着从易到难,从简到繁的方针,使读者在阅读中能够保持循序渐进、有的放矢,确保头脑清醒,学习时不迷茫。与此同时,由于 10.1 版软件界面采用英文风格,考虑到有些初学者可能对英文 GUI 界面版本的操作理解困难,因此编者在一开始的内容介绍和后续例题中加入了对应操作界面中文术语翻译,并在后面附上括号,输入软件原版的英文术语,力争使读者能够快速进入对 Diana 英文版界面的熟悉状态。这里需要指出的是,例题编写过程中采用的数据均为作者臆想和假定的数据,没有经过专业性土木工程试验的检验和论证,所以难免会和实际情况有所偏差,读者在阅读本书例题时理应具有批判性眼光,一方面应着眼于重点学习软件的操作要义,对书中的计算分析结果做到批判性吸收,对作者在书中提到的建模操作的学习能够做到举一反三,触类旁通;另一方面在学习这些具体操作的同时还应着眼于书中有哪值得改进之处,或者站在读者自身角度思考是否有更好的本构模型抑或是更为快捷的建模思路与建模方式,怎样可以做得更好,模拟得更精确。



(a) 玻璃移动桥(芬兰)

(b) 英国伦敦滑铁卢和城市线人行连接隧道  
(Waterloo and City Line pedestrian link tunnel)

(c) 芬兰赫尔辛基西延线凯拉涅米站(Helsinki subway Western extension, Keilaniemi station)

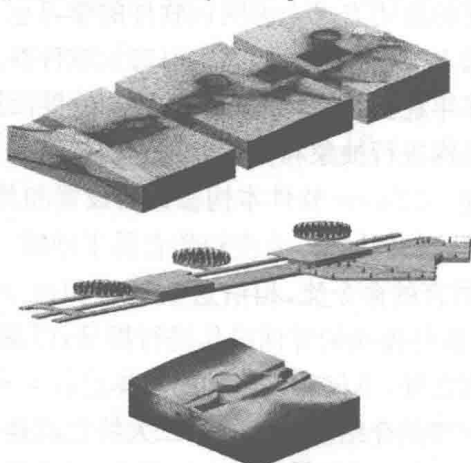


图 1.1-1 Diana10.1 数值模拟案例

本书的内容分为以下几个章节展开:第一章主要介绍 Diana 的相关特性,从软件的主要功能,安装运行,常用单元类型,文件系统,用户图形 GUI 操作界面以及常用的 Python 语言命令流等几个方面进行介绍,且重点介绍 DianaIE 的用户可视化界面操作 GUI 的主要功能,以方便初学者能比较快速入门。同时本书作者也考虑到对那些 Diana 操作水平较高,从老版的 iDiana 软件系统刚刚升级到 Diana10.1 软件的老用户而言,在书中也添加了一些老版的元素与新版相同内容进行对比验证和对比学习。第二章主要介绍 Diana 软件中的混凝土和钢材本构类型、混凝土裂缝类型和全世界各混凝土规范和钢材规范的本构特性。第三章编制了大量例题介绍 Diana10.1 最基本的前处理建模和非线性计算的操作,为使得使用 Diana9.6 之前版本的老版用户在升级后能够缩短熟练使用 Diana10.1 版的学习时间,其中个别例题来自于 Concrete Tutorial 9.4 版本教程中非常具有代表性的例题,本书重新采用 Diana10.1 建模,使得这部分读者可以用最快的速度融会贯通,掌握新版软件的基本操作技能。除此之外,对于土木工程研究热点中的低周循环加载下的滞回分析和动力学抗风抗震领域时程分析等热点问题也有涉及。第四章主要涉及施工阶段中存在的水化热暂态反应,并根据日本、欧洲和美国不同规范,采用 Diana 软件对大体积混凝土进行热分析。第五章围绕预制节段拼装梁的受剪破坏、长期性能和随机场预测编写了三节的例题。第六章基于作者建模经验,对该软件目前存在的一些不足和可以改进之处提出了一些建议。

## 1.2 Diana 软件的主要功能和安装运行

Diana 是一款具有丰富材料本构和强大非线性分析功能的结构有限元分析软件,也是在结构、桥梁、岩土、隧道、地下、水利、市政消防等各项工程领域有着广泛应用的高端非线性分析有限元软件。所谓的非线性,就是在荷载作用下结构产生较大位移和变形,而这种变形对平衡有着较大的影响,因此结构的变形协调方程建立于变形后的状态。对于非线性计算往往采用迭代计算方法。在 Diana 中也可以精确模拟钢筋混凝土结构从初始状态到产生裂缝,不断扩展,继而最终倒塌的整个过程。这种模拟精确考虑了结构的实际几何形状、混凝土的材料本构模型特点,在嵌入式钢筋杆单元和嵌入式钢筋网片与混凝土单元耦合方式以及钢筋与混凝土相互之间有粘结(Fully-bonded)、无粘结(Non-bonded)、粘结滑移(Bond-slip)等力学特性方面有着较为精确的模拟。在抗震方面,Diana 不仅提供可应用于结构设计的线性动力分析功能,还提供考虑地震反复荷载作用历程的非线性动力分析功能。Diana 在岩土开挖、大坝分析等方面也具有优异功能。例如,施工阶段分析、土体与结构的协同分析、流固耦合分析、用户自定义本构模型、多种界面单元、大变形及大应变分析、材料非线性分析、考虑时间影响及环境影响效应的分析、非线性动力分析等。同时,Diana 在隧道工程领域也有很多应用。常规的隧道分析和设计主要针对隧道的开挖或者衬砌的受力进行分析。Diana 的热力学还被广泛用于结构在火灾中的分析,大体积混凝土水化热反应等温度影响下的结构性能分析。

Diana10.1 版软件主要包含两个模块,一个是由荷兰 Diana 研发团队最新开发 GUI 界面操作的 DianaIE 模块,一个是保留了 Diana9.6 版软件前处理功能的 iDiana 模块。新老用户在使用过程中,根据自己的熟练程度,既可以在 DianaIE 交互环境下直接使用 GUI 操作

界面进行建模计算,也可以在传统的 iDiana 模块中导入编辑. bat 二进制模型程序文件生成模型,此外,使用 DianaIE 文件还可以导入 IGES,STEP IGES,STEP 等 CAD 模型,并且在导入的模型的基础上进行后续的建模操作。

接下来作者对该软件在土木工程分析中较为成熟的应用作一些简要的介绍。

其中 Diana10.1 运用的主要领域有:

- (1) 钢筋混凝土结构的开裂分析。
- (2) 大体积混凝土的水化热分析。
- (3) 混凝土结构收缩徐变等长期时变性能下的非线性分析。
- (4) 结构的阶段性分析。
- (5) 砌体结构的抗震分析。
- (6) 运用随机场理论预测裂缝宽度。
- (7) 低周试验及循环荷载试验下的钢筋混凝土结构滞回分析。

Diana10.1 版本和 9.4 版本类似,用户需要先购买软件并经总公司注册许可之后才能使用。与同时适用于 XP 系统、32 位 Windows 系统和 64 位 Windows 系统的 9.4 版不同的是,新版的 Diana10.1 软件只支持 Windows 64 位计算机系统。与此同时,Diana10.1 版安装环境必须在计算机联网状态下才能进行。为保证后续安装程序顺利运行,用户在安装前应关闭所有杀毒软件或者将 Diana 中的相关安装文件(Setup. exe 和 Dianahasprus. exe)添加进信任区。Diana10.1 版软件采用软件密钥文件加密和计算机物理绑定方式。用户在购买后首先应将 c2v 文件发送到代理公司进行许可证状态的激活,激活后用户可登陆 Diana 官网(<http://tnodiana.com/Diana-downloads>)下载相关的 Diana 10.1 安装模块。

Diana9.4 版软件包主要由三个部分组成,即启动程序文件 Setup. exe 文件安装、硬件密钥 HASPUser Setup. exe 文件安装以及 MIDAS 模块的安装,而 Diana10.1 软件的安装主要涉及到三个方面:

(1) DianaIE 的安装。下载 Setup. exe 文件并进行安装。安装成功后的 Diana 软件主要包括 bin 启动文件夹、binseg 文件夹、执行注册功能的 lib 文件夹,以及用于编辑 Python 语言的 python 文件夹,包括目前暂以 9.6 版 Diana 手册内容为主的 PDF 文件夹,如图 1.2-1 所示。

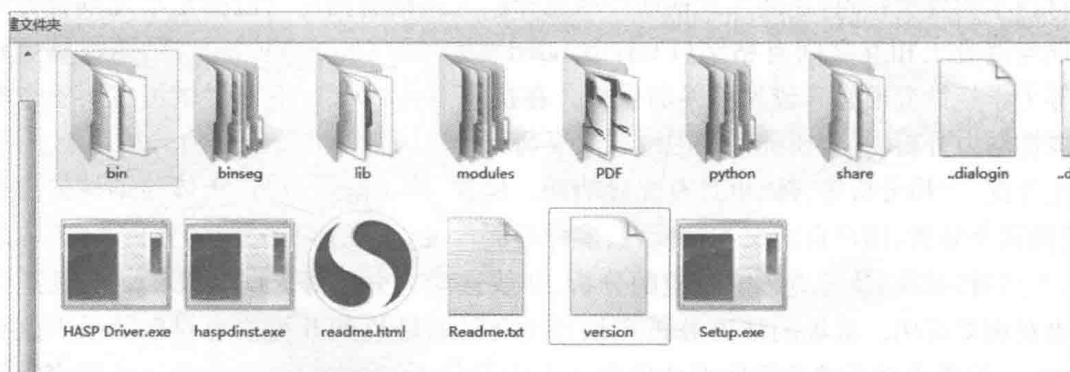


图 1.2-1 Diana 软件文件夹

(2) Dianahasprus. exe 文件密钥的安装。在安装 Dianahasprus. exe 之前,用户必须购买该软件并向总公司或就近向本地区所在的代理服务公司提出 c2v 文件密钥激活和许可证

状态激活申请,待文件在公司总部激活成功并更新许可证信息后方可安装。安装注册中密钥号信息,激活 c2v 文件及更新许可证信息程序资料所有权归公司所有,用户一律不得擅自披露。

(3) iDiana 模块的安装。由于 iDiana 模块保留了之前 Diana9.6 版本的前处理特色,因此该部分安装方式与老版本相同。

待完成 Dianahasprus.exe 的信息注册与升级后,点击 Setup.exe,弹出如图 1.2-2 所示界面:

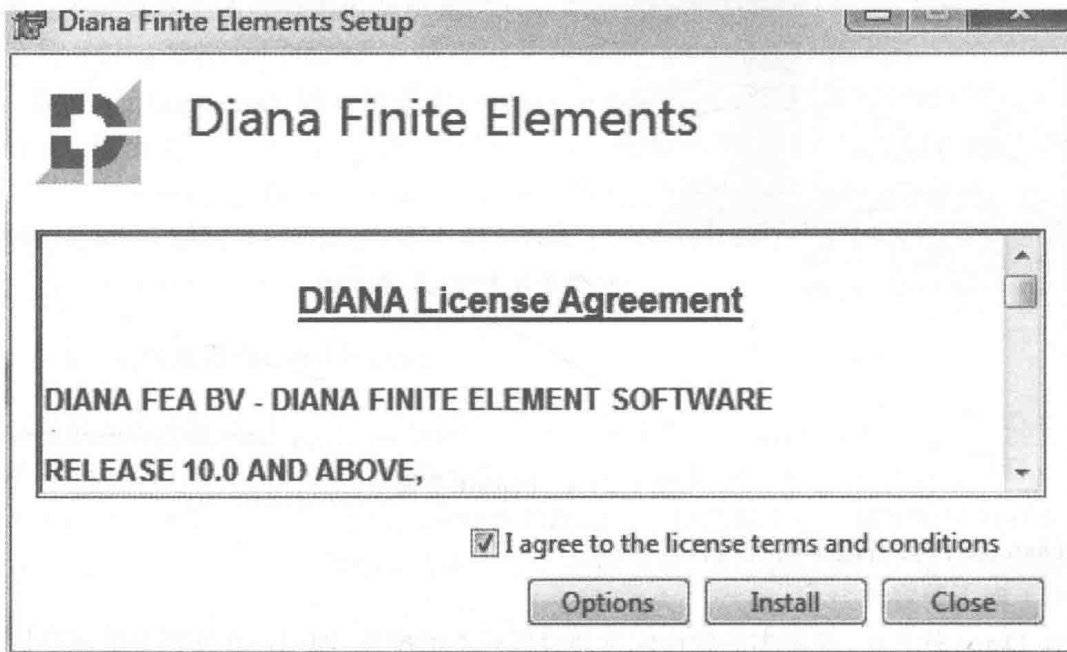


图 1.2-2 Setup 界面

点击 Install,出现初始化程序界面,进入程序安装流程,如图 1.2-3 所示。

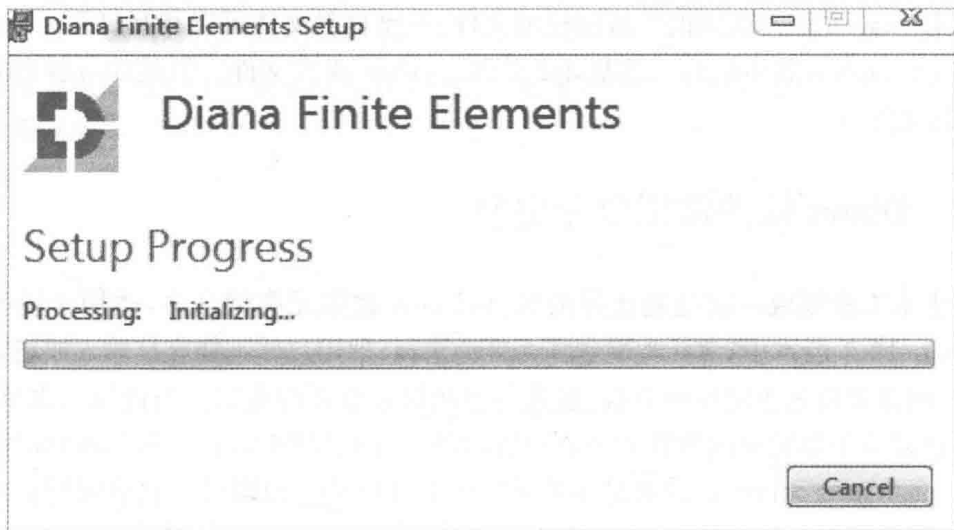


图 1.2-3 程序安装流程

安装完成后,点击 OK,弹出 DianaIE 界面,表示 DianaIE 安装成功。如图 1.2-4 所示。

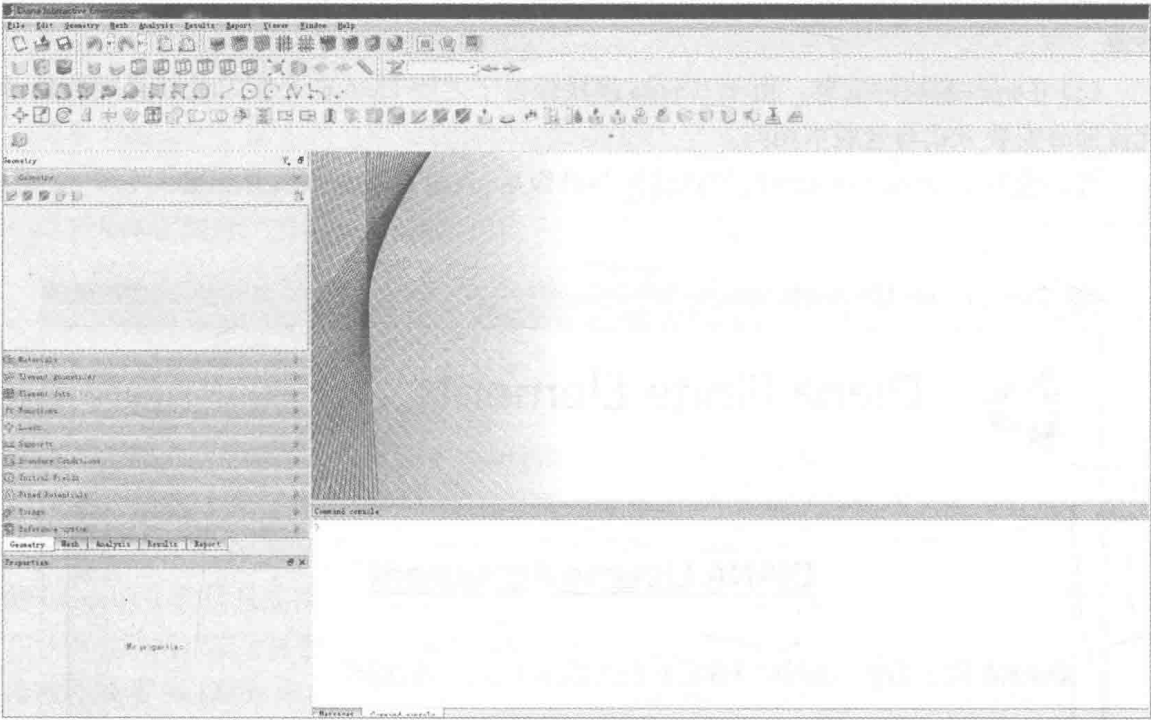


图 1.2-4 DianaIE 界面

Diana 文件具有以下两种特性:

(1) 向下兼容性

在 Diana 软件中,高版本的软件配置兼容低版本的配置,即用户在使用升级版高版本的软件时,可以打开任意一种低版本的文件。

(2) 同级别通用性

版本数中小数点前整数位相同的 Diana 软件运行文件可以相互打开。(例:Diana9.4 可以打开 Diana9.3 版本生成的二进制模型文件,模型材料文件可以相互打开。Diana 10.1 可以打开 Diana10.0 版生成的二进制 dpf 文件、python 语言文件。但是10.1版本的打不开 9.4 版本的文件。)

1.3 Diana 软件常用单元类型

作为土木工程领域一款性能优异的软件,Diana 的单元类型众多,适用于各种结构分析。在 Diana10.1 版本中,单元类型选择为自动选择,即用户并不能直接输入或指定单元类型和名称,而需要首先指定模型维数、划分类型和划分单元的个数。当选择二次单元时,用户还需要设置每个单元中间位置处节点位置的确定方式(Mid-side node location)是采用线性插值(Linear interpolation)或者是在单元形状上(On shape)即可。在后续网格划分步骤中,用户还需根据需要的对象,再次设置划分类型及单元中间位置处节点位置的确定方式,软件根据用户设置的这些参数,待网格智能划分成功后在 GUI 可视化界面 properties 属性栏名目下的划分类型 meshing 栏中会自动显示网格的单元类型。Diana 结构中单元分

类方式众多。按照单元的维数划分可以分为 1D 单元、2D 单元和 3D 单元。根据数值积分类型的不同,又可以分为按面域积分 (Area Integration) 和高斯数值积分 (Gauss Integration) 两种方式。按照形状分类,可以分为线单元 (Line Elements)、面单元 (Face Elements)、体单元 (Solid Elements),其中面单元内部又可以分为三角形单元 (Triangle Elements)、四边形单元 (Quadrilateral Elements);体单元内部又可分为四面体单元 (Pyramid Elements)、三棱柱单元 (Wedge Elements) 和六面体单元 (Brick Elements);按照单元坐标变换和位移函数所用形函数阶次是否相等可以分为等参单元和非等参单元;按照力学特征不同总体上还可分为桁架单元 (Truss Elements)、梁单元 (Beam Elements)、平面应力单元 (Plane Stress Elements)、平面应变单元 (Plane Strain Elements)、弯曲板单元 (Plate Bending Elements)、轴对称单元 (Axisymmetric Elements)、平面壳单元 (Flat Shell Elements)、曲面壳单元 (Curved Shell Elements)、实体单元 (Solid Elements)、界面单元 (Interface Elements)、接触单元 (Contact Elements)、弹簧单元 (Spring Elements)、组合单元及其他可用于结构分析的单元。本书重点介绍土木工程领域中常见的各类单元。对于与流体或热分析等其他领域有关的单元,这里不予赘述。

1.3.1 桁架单元 (Truss Elements)

桁架单元可分为 2D 桁架单元以及 3D 桁架单元,根据位移变量的不同又可以分为普通桁架单元 (Regular Element) 和高级桁架单元 (Enhanced Element)。桁架单元的特点是垂直于单元长度方向的直径相对于单元的杆件长度而言可以忽略不计。桁架的变形只有沿着杆长方向的轴向伸缩变形,无剪切或弯曲变形。按照维数、节点数以及自由度数的不同可以分成 L2TRU、L4TRU 以及 L6TRU 等单元。

1. 普通桁架单元 (Regular Element)

L2TRU 单元属于普通桁架单元。该单元由两个节点构成。可模拟桁架、弹簧或者预应力筋受力特征。其单元名称中 L 表示单元形状为直线 (Line),数字 2 表示该单元的自由度数,TRU 表示该单元是桁架类型 (Truss) 单元。每个节点只有一个沿着轴向的伸缩位移,可以沿着节点 X 或 Y 或 Z 单一坐标轴平动方向移动,如图 1.3-1 所示。单元的位移插值函数为线性方程。该单元只能承受拉压,不能承受弯矩作用。在单元的局部坐标系 x 方向上存在着质量分布,但在整体坐标系 X,Y,Z 轴方向上质量无法分布,因此在动力分析中不可使用该单元。普通桁架单元的特性见表 1-1。



图 1.3-1 L2TRU 桁架单元位移自由度示意图

表 1-1 普通桁架单元特性表

|      |       |
|------|-------|
| 单元特性 | 参 数   |
| 单元名称 | L2TRU |
| 节点个数 | 2     |

(续表)

| 单元特性    | 参 数                         |
|---------|-----------------------------|
| 维数      | 2                           |
| 单个节点自由度 | 1                           |
| 单元总自由度数 | 2                           |
| 位移插值函数  | $u_x(\xi)=a_0+a_1\xi$       |
| 位移      | $U_x$                       |
| 几何特征参数  | 截面面积                        |
| 适用范围    | 沿着单轴伸缩的 2 维桁架、拉索、弹簧、体外预应力筋等 |

2. 高级桁架单元(Enhanced Element)

L4TRU 是一个两节点的桁架单元,每个节点上有沿着 X 和 Y 两个方向的 2 个自由度,单元形状为直线,单元名称中数字 4 代表了该单元自由度总数。每个节点具有沿着节点坐标系 X 方向和 Y 方向的平动位移,可以沿着坐标轴方向移动。该单元只能承受拉压,不能承受弯矩作用。单元的参数特征见表 1-2。

表 1-2 L4TRU 单元的参数特征

| 单元特性    | 参 数                   |
|---------|-----------------------|
| 单元名称    | L4TRU                 |
| 节点个数    | 2                     |
| 维数      | 2                     |
| 单个节点自由度 | 2                     |
| 单元总自由度数 | 4                     |
| 位移插值函数  | $u_i(\xi)=a_0+a_1\xi$ |
| 位移      | $U_x,U_y$             |
| 几何特征参数  | 截面面积                  |
| 适用范围    | 2 维桁架、拉索、弹簧           |

L6TRU 桁架杆单元同样由两个节点构成,单元形状为直线,单元名称中数字 6 代表了该单元自由度总数。每个节点具有沿着节点 X,Y,Z 三个方向的平动位移,可以沿着 X 或 Y 或 Z 方向平动。该单元同样也只能承受拉压,不能承受弯矩作用。单元的参数特征见表 1-3。

表 1-3 L6TRU 单元的参数特征

| 单元特性 | 参 数   |
|------|-------|
| 单元名称 | L6TRU |
| 节点个数 | 2     |
| 维数   | 3     |

(续表)

| 单元特性    | 参 数                   |
|---------|-----------------------|
| 单个节点自由度 | 3                     |
| 单元总自由度数 | 6                     |
| 位移插值函数  | $u_i(\xi)=a_0+a_1\xi$ |
| 位移基本变量  | $U_X,U_Y,U_Z$         |
| 几何特征参数  | 截面面积                  |
| 适用范围    | 3 维桁架、拉索、弹簧           |

3. 索单元(Cable Elements)

索单元形状皆为曲线,并且每一个单元相较于桁架单元有更多自由度,因此这些单元适用于悬索结构的大变形的几何非线性问题的分析,同时也适用于单根曲线预应力钢束和普通钢筋混凝土结构中的曲线钢筋模拟。根据维数和单元自由度的不同,索单元可以分为 CL6TR(2 维单元,6 个自由度)、CL8TR(2 维单元,8 个自由度)、CL10T(2 维单元,10 个自由度)、CL9TR(3 维单元,9 个自由度)、CL12T(3 维单元,12 个自由度)、CL15T(3 维单元,15 个自由度)。

1.3.2 梁单元

Diana 梁单元具有广泛的工程应用背景,可在实际结构中模拟钢筋混凝土梁、预应力混凝土大跨结构。根据维数以及单元自由度的不同,梁单元可分为 L6BEN, L7BEN, CL19BE, CL12B, CL15B(其中开头的字母 C 是 Curved 缩写,表示该梁的形状是曲线梁的意思),根据梁单元形状的不同又可以将梁单元分为直线梁单元(以字母 L 开头的单元)和曲线梁单元(以 C 字母开头的单元),而根据梁单元适用理论和受力特性的不同,梁单元还可以分为第一类梁单元、第二类梁单元和第三类梁单元。

1. 第一类梁单元(CLASS-I Beams)

第一类梁单元主要是直线型梁单元,此类单元基于平截面假定和欧拉-贝努利梁理论(Euler-Bernoulli beam theory),在分析中不考虑剪切变形,建模中还可以根据用户的需要将 Diana 材料定义后的截面几何特性赋予不同形状的截面(例如矩形、T 形、I 形、箱形等)和所需的截面尺寸。第一类梁单元主要应变类型有纵向拉伸应变、弯曲应变,以及对 3 维梁单元而言具有的平面外的扭转变形。应力由法向应力和弯矩组成。在第一类梁单元中,位移和转角被认为是非独立变量,故通常用单元 y 方向位移的二阶导数来表示曲率。具有“剪力锁死”特性的铁木辛柯梁也属于这类单元。此类梁单元不仅适用于分析采用梁单元建模的混凝土结构,同时也适用于解决预应力筋单元中采用离散式钢筋单元模拟单根具有无粘结、有粘结或者粘结滑移特性的预应力筋与混凝土结构的耦合问题。通过形状系数的设置可实现该类梁单元与考虑剪切变形和转动惯性,具有“剪力锁死”特征的铁木辛柯梁单元之间的转换。

2. 第二类梁单元(CLASS-II Beams)

与第一类梁单元相比,第二类梁单元同样基于平截面假定和贝努利理论,单元的位移与转角同样被认为是非独立的变量。在此类梁单元中,同样不考虑剪切变形的影响。与第一

类不同的是,第二类梁单元考虑梁单元沿轴向相对变形。由于此类单元在截面上沿单元坐标轴方向采用插值类型数值积分,因而这类梁单元适用于几何非线性分析和物理非线性分析。常用的 L7BEN 即属于这种类型的梁单元。

3. 第三类梁单元(CLASS-III Beams)

与前两类梁单元相比,第三类梁单元主要为曲线梁单元,与第二类梁单元类似,此类单元在截面上沿单元坐标轴方向采用插值类型数值积分,在 Diana 有限元分析中该类型梁单元考虑剪切变形的影响,且位移和转角为相互独立的变量,即由节点上的法向位移和转角各自独立插值。由于单元上节点较多,因此该类型单元往往为曲线梁单元(Diana9.6 版之前的第三类梁单元均为曲线梁),位移函数也往往具有较高的阶数,因此在与其它单元相连时具有较好的位移协调性和单元之间的边界适应性。

Diana 10.1 版中中三种类型的梁单元对应的特征见表 1-4。

表 1-4 三类梁单元

| 单元类别   | 单元名称  | 维 数 | 节点个数 | 总自由度数 | 受力特征            | 位移基本变量                                              |
|--------|-------|-----|------|-------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| 第一类梁单元 | L6BEN | 2   | 2    | 6     | 不计剪切变形和轴向相对变形   | $U_x, U_y, \phi_z$                                  |
|        | L12BE | 3   | 2    | 12    | 不计剪切变形和轴向相对变形   | $U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$             |
| 第二类梁单元 | L7BEN | 2   | 2    | 7     | 考虑轴向相对变形,不计剪切变形 | $U_x, U_y, \phi_z, \Delta u_x$                      |
|        | L13BE | 3   | 2    | 13    | 考虑轴向相对变形,不计剪切变形 | $U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z, \Delta u_x$ |
| 第三类梁单元 | CL9BE | 2   | 3    | 9     | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, \phi_z$                                  |
|        | CL12B | 2   | 4    | 12    | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, \phi_z$                                  |
|        | CL15B | 2   | 5    | 15    | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, \phi_z$                                  |
|        | CL18B | 3   | 3    | 18    | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$             |
|        | CL24B | 3   | 4    | 24    | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$             |
|        | CL30B | 3   | 5    | 30    | 考虑剪切变形          | $U_x, U_y, U_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$             |

注:在计算初应变和初应力的时候,第二类梁单元上作用的自重和分布荷载在计算中不予考虑。

1.3.3 平面单元

平面单元是一种以 2D 为主的单元,在结构的中轴线位置建立模型,确定单元类型后,再通过几何属性模块赋予单元厚度即生成平面单元。3D 平面单元在诸多方面与壳单元具有很强的相似性。在 Diana 中,根据单元受力形式的不同,平面单元又可分为平面应力单元(Plane Stress Elements)、平面应变单元(Plane Strain Elemnts)。

1. 平面应力单元(Plane Stress Elements)

平面应力单元是由平板形状的单元组成,故又称为平板单元。一个单元上的所有节点都必须位于同一个平面之内,平面应力单元的两个重要的特征是:① 厚度方向的尺寸相对于单元的长度和宽度可以忽略不计;② 垂直于板面方向的局部应力为 0,即垂直于平面沿厚度方向的应力  $\sigma_{zz}=0$ 。Diana10.1 软件根据用户实际建模的需要,可提供 2D 和 3D 的平面