## 1.1 案例介绍

本案例对一个商用电梯的钢结构框架进行静力学分析,以简单介绍 ANSYS Workbench 15.0 静力学分析模块的操作和使用。作为第一个案例,还简单介绍了一些软件初始设置的经验与技巧。

## 1.2 分析流程

如果你患有密集恐惧症,也许细密的网格线会让你很难受;如果你患有色盲或色弱,彩 色的结果云图你也许会看不清;如果你对未知领域的知识不知道如何学习,请先学习掌握未知 领域知识的学习方法,再考虑是否开始学习有限元;如果你克服不了自学时的艰苦与寂寞,请 放弃有限元。

有限元分析的求解规模往往较大,由于 32 位操作系统所支持的最大内存容量约为 4GB, 当分析规模稍大时(如采用三维实体单元进行线性静力学分析,超过 10 万网格),很可能出 现因内存容量不足而严重影响求解效率(如采用直接求解器,当求解规模大到超过某一极限 值时,求解时间可能忽然增加数倍或十几倍)或者无法满足求解时必需的内存容量而软件自 动退出的情况。

从软件层面考虑,64 位操作系统所支持的内存容量几乎可以满足各种规模有限元分析的 需求,从硬件层面上讲,主流的 Intel 公司与 AMD 公司的 CPU 均支持 64 位技术。

因此笔者强烈建议用户安装 64 位操作系统及 64 位版的 ANSYS Workbench 15.0 软件。16.0 版仅支持 64 位系统。

如在第 25 章中所介绍的,有限元分析时,计算机的内存容量是决定能否求解或者能求解 多大规模的必要性条件,而所有其他的硬件性能(如内存速度、硬盘速度、显卡速度、CPU 浮点运算能力、CPU 前端总线带宽、硬盘容量、主板的扩展性等)都是充分性条件一样,保 证计算机有足够的空闲内存容量用于求解是第一位的。

ANSYS Workbench 15.0 软件的安装需要采用管理员身份登录操作系统,并顺序安装。 软件安装难度不高,并且不同版本间的安装步骤几乎一致。15.0 的安装步骤较 12.1 等老版 本略显简化,较为容易出现问题的是许可证的加载。一般而言只需安装主程序和许可证程序, 而无需安装适合于多机联网并行求解所用的 MPI 程序等,即主安装界面中左边的第一项和 第四项。

笔者第一次安装 ANSYS 12.1 的时候花费了 3 天时间,安装了不下 5 次才成功;现在安装 ANSYS 15.0,在采用了固态硬盘的计算机上只用了半小时。

在不同的求解规模下,15.0的求解时间比14.5平均快约10%,因新版的ANSYS Workbench 融入了最新的软件技术与算法,整体上在执行同等计算规模时对硬件的需求较老版本更低,且 多核心并行效率更高,故选择高版本的软件在一定程度上是"帮助"用户实现了性能升级。

不同版本软件间的操作大体相当,选择教材时,12.1、13.0、14.0、14.5、15.0都可以 满足大部分情况。新版教材主要对新功能和新思想进行介绍。在本书中,笔者花费大量心 血,以自己实际使用 ANSYS Workbench 15.0软件的经验和学习有限元技术的方法为特色 进行重点讲解。不仅仅如市面上绝大多数教程一样对 ANSYS Workbench 15.0软件的使用 方法进行介绍,更在书中遍置笔者的实践经验、技巧和个人领悟,而这才是本书的真正内 涵所在。

注意:由于本书包含的信息量极大,并且介绍的很多知识是可以在不同产品或不同应用 下通用的,建议用户全面阅读全部内容后逐条选择最适合用户实际需求的信息进行重点了解。

有限元软件诞生后,第一个实现的功能是静力学分析,也是计算结构力学分析领域中最基础的应用方向。有限元软件,最初用来对飞机结构进行数值模拟仿真。就 CAE (Computer Aided Engineering,计算机辅助工程)程序而言,对线性静力学分析,在技术层面上早已不是 难题。可能存在的问题通常限于对大型问题的方便建模和有效求解。

在静力学分析中,不考虑结构的惯性和阻尼效应,其用于荷载恒定或变化速率不明显,以 至于可以认为是静态加载状态时的模拟。

开始第一个分析案例前,先对 ANSYS Workbench 15.0 软件进行基本设置。有很多种方式可以打开 ANSYS Workbench 15.0,最常用的方式是单击"开始"→Workbench 15.0,如图 1-1 所示。也可以使用单击"开始"→"所有程序"→ANSYS 15.0→Workbench 15.0 的方式。

在打开过程中,会弹出如图 1-2 所示的界面。此界面从 Workbench 13.0 以后就几乎未被更改,其左下角显示当前内部插件的开启过程,右上角显示软件版本号为 15.0。

稍等约半分钟后软件打开。第一次打开软件时会弹出欢迎界面,如图 1-3 所示。其中会提示一些软件基本信息和操作方法。建议熟练后关闭此对话框,以减少操作步骤。单击左下角的 Show Getting Started Massage at Startup 按钮,再单击 OK 按钮。

注意: ANSYS Workbench 15.0 及其他版本的 ANSYS 软件经常会出现许可证丢失的问题, 一般关闭软件重新打开即可。

打开设置菜单。单击菜单栏中的 Tools (工具)→Options (设置),如图 1-4 所示。

设置背景色。单击左上角的 Appearance (外观)。背景色主要根据个人习惯设置。为了方便查看,笔者将案例中的背景色设置成纯白色; ANSYS Logo (ANSYS 商标)设置成 Black (黑色); Text Color (文字颜色)设置成蓝色。纯白色的背景也有利于生成计算报告图时的截图和打印,如图 1-5 所示。



图 1-3 欢迎界面



图 1-6 所示为笔者习惯的背景色设置。在 Background Style(背景风格)下方单击右侧的 下拉列表按钮,单击 Diagonal Gradient(梯度对角线); Background Color(背景色)设置为淡淡的青色,如图 1-6 所示。







图 1-7 所示为使用图 1-6 设置的实际背景色的效果。模型为第 14 章发动机叶片周期扩展 分析案例中采用的子模型。模型下方横向的标尺实时显示了当前视角下的尺寸(如图中的

- March

900mm)。右下角全局坐标系的方向是建立模型时确定的。如果需要隐藏 ANSYS Logo,可将 图 1-5 中的 ANSYS Logo 栏设置成 Off。

开启测试模式。测试模式(Beta Options)是调用 ANSYS Workbench 平台中尚未完全成熟的软件功能,一般供较有经验的用户使用,以帮助 ANSYS 公司测试并改进新功能。当测试功能足够成熟稳定后,会在最新版本的 ANSYS 软件中成为正式功能。

单击左上角的 Appearance (外观),单击右边的 BetaOptions (测试模式),如图 1-8 所示。



图 1-7 习惯设置效果

Journals and Loga         Polysit Reporting           Polysit Reporting         Oligiday           Solution Process         Number of Significant Digits           Extrainers         5           Mechanical APOL         6           Mechanical APOL         6           Mechanical APOL         6           Mechanical APOL         7           Mechanical APOL         7 <t< th=""><th>Project Management     Appearance     Regional and Language Options     Graphics Interaction</th><th>Meshed</th><th>L.</th></t<>	Project Management     Appearance     Regional and Language Options     Graphics Interaction	Meshed	L.
Plant     P	- Journals and Logs - Project Reporting - Solution Process - Extensions - Mechanical APOL - CPX - Description	Deplay Number of Significant Digits 5 Number of Files in Recently Used Files List	
<ul> <li>Word-wrap rext in rables</li> </ul>	- Fluent - Mechanical - Microsoft Office Excel - TurboSystem - Menting - Design Epiforation - Geometry Import	Perce Options     Perce Options     Perce Options     Connections are Bundled at Startup     System Coordinates are Shown at Startup     Quick Help Icons in System Cells     Word-warp Text In Tables	

图 1-8 开启测试模式

处于测试模式的功能会在其名称后方添加"(Beta)"字样。如 Workbench 15.0 中的形状优 化模块 Shape Optimization (Beta), 其后方就出现了该字样,代表其部分功能还处于测试阶段。

语言设置。ANSYS 官方提供了英语、法语、德语、日语 4 个版本。很遗憾,软件出品 44 年来没有官方的中文版,但是可以通过二次开发的形式定制编写汉化的界面。笔者在 2011 年 7 月初学 ANSYS Workbench 12.1 时,一直受语言不通的困扰,曾经设置成日文版使用了三个 月,以期在片假字中获得些许对中文的亲切感。

无论如何,在绝大多数用户无法使用中文界面的情况下,使用英文原版更有利于深入学 习与交流。虽然在初学阶段可能会被语言问题严重困扰,但是随着经验的增加与操作的熟练, 使用英文版会成为习惯。并且常用的英文词汇不超过2000个,用多了就记住了。还可以通过 记忆词汇的位置和对应图标的方式帮助记忆。

笔者 2011 年 7 月第一次接触神奇的 ANSYS 软件是源自当时哈尔滨工业大学某教授给我 公司做了为期一周的 ANSYS 12.1 经典版面授培训。培训中他举了一个例子,曾经有个来自巴 基斯坦的留学生,学习 ANSYS 软件时用了一个月的时间,通过自学其帮助文件就基本学会了。

令人欣慰的是,当模型数据带有中文或将计算文件保存到中文目录时或者模块中使用中 文标题等,基本都可以被 Workbench 完全识别。例外的是,在第14章发动机叶片周期扩展分 析案例中介绍了使用 Workbench 自动截图功能或者自动生成报告文件,将截图另存时保存目 录出现中文字样会报错。

设置语言可单击 Regional and Language Options (语言设置),再单击右边下拉菜单选择合适的语言,如图 1-9 所示。

并行计算设置。数值模拟常常是大规模的科学计算,一般依靠 CPU 的浮点计算能力进行 偏微分方程的求解,硬件上往往使用多核心并行计算的方式提高整体性能。一部分用户反馈, 虽然使用了具有多核心 CPU 的计算机,但是 ANSYS Workbench 运行过程中仍然只使用了一 个核心。如采用 4 核心 8 线程的 CPU,在默认开启超线程技术的情况下求解某项目,在系统 的任务管理器中查看 CPU 占用率,一直维持在 13%左右的水平上,或在主板 BIOS 中关闭超 线程技术后 CPU 占用率一直维持在 25%左右。这可能是在 ANSYS 软件中未开启多核心并行 计算功能的原因。

单击 Solution Process(求解核心数)→Default Execution Mode(默认模式),其默认为 Serial (串行),下拉选择 Parallel(并行),如图 1-10 所示。这是使软件调用多核心计算的简单方法。 当使用多台计算机组成的集群时,ANSYS 一般使用基于 MPI 的并行通信方案。





```
图 1-10 并行计算设置
```

虽然已经在此处开启了并行计算,但是软件默认的可并行核心数仅是 2。对于绝大多数用 户使用的物理核心数量大于两个的计算机,单纯用此法仍无法完全发挥 CPU 性能,需要手工 设置核心数量。

单击 Mechanical APDL (机械设计 APDL),在右边的 Processors (核心数量)下方输入实际的物理核心数量,此处暂时为 20。此处设置的核心数如果超过了计算机实际的物理核心数,求解时软件会发出警告,但不影响计算。

注意:软件实际可调用的最大核心数量受到计算机物理核心数量与软件许可证中对核心数量限制的限制(一般为8个物理核心),两者取较小值。

现在,几乎全部的多核心 CPU 都使用超线程技术,以增强部分应用下的执行效率。笔者做了其他条件相同的情况下,是否开启 CPU 的超线程技术,求解时间的测试。结论是采用直接求解器进行分析,关闭超线程技术后,会较默认开启时,在 CPU 长时间满负荷运行的求解时节约 10%左右的计算时间。关闭超线程技术需要在计算机开机的硬件自动检测阶段进入BIOS 中设置。其设置方法随不同的主板 BIOS 而略有差异,请用户自行参考主板说明书。

在刚刚升级到 15.0 版本时,笔者也做了一个同样的分析项目,不同网格数量下,14.5 版 与 15.0 版求解时间的对比测试。结论是 15.0 大约比 14.5 快 10%。所以追求新版本是有利的。

当分析规模较大或者可能分析规模不大,但是求解所需的内存容量超过计算机实际的内 存容量时,需要的磁盘空间可能会很大,需要设置一个较大的工作空间,否则软件会报错而自 动退出计算。

单击 Mechanical APDL,将 Database Memory(数据库空间)从默认值 512MB 调小,最小为 32MB,此处设置成 64MB,并将 Workspace Memory(演算空间)的容量从默认值 1024MB 调大至 102400MB。

计算机通过内存条得到物理内存。ANSYS 运行时除了需要物理内存空间外,还需要一定

的工作空间。求解规模较大时,ANSYS 程序实际需要的内存空间经常大于真实的内存,额外的内存即为虚拟内存(通过使用计算机的一部分硬盘空间来代替物理内存。由于硬盘的读写速度约为内存的百分之一,当程序不得不调用虚拟内存时,其整体性能受到严重影响,以至于可能的求解时间是内存空闲容量较多时的数十倍)。被用来作为虚拟内存的硬盘空间又称为交换空间。工作空间分为两部分:数据库空间(Database Memory)和演算空间(Workspace Memory)。数据库空间与几何建模、设置的边界及载荷等数据有关;演算空间则用来进行所有内部的计算,如单元矩阵的形成、布尔计算等。

如果模型数据库太大,导致数据库空间不足时,ANSYS程序就会调用虚拟内存;如果演算空间不能满足内部计算需要的空间,则ANSYS程序会分配额外的内存去满足其需要。 Database设置过小,还会导致读取结果文件时间过长。设置位置如图1-11所示。

Options	and the second	
Project Management Regen mod Regen and Language Options or garkics interestion Sources and Logs Project Reporting Solution Process Extensions Mechanical Article Repository Mechanical Management Management Mechanical Mech	Wedness APLC           -Analysis           Commend Line Options           Database Memory (MB)           (Address of the options)           Wedspace Memory (MB)           (Code)           Processors           [2           Job Name           File           Lizense	
	Graphics Device None IF Databated Machine Lat I GPU Accelerator Pane	
Restore Defaults	The state of the state	OK Cano

图 1-11 并行核心数

模型接口设置。要具有与其他软件之间的模型接口功能,需要相应的许可证支持。本书中所有案例采用的模型均使用三维机械设计软件 Solidworks 建立,并导入 ANSYS Workbench 15.0 平台计算。Workbench 平台使用的模型内核基于 Parasolid(X-T)平台。虽然 Workbench 15.0 可以识别几乎全部建模软件建立的模型,但是当模型保存为\*.X-T 格式时具有最好的识别精度与速度。建议使用其他软件建立分析模型的用户,尽量将模型另存为此格式。如果遇到部分特征不识别等错误时,也可以尝试\*.igs 或\*.spt 等其他中间格式文件导入。

学习优化设计模块的预备知识。虽然使用中间格式可以提高物理模型的识别精度与速度, 但是如果模型需要使用 Workbench 优化设计模块进行模型特征数据识别时,建议仍使用建模 软件默认的格式导入。

注意:不是所有的模型特征数据都能被识别。默认情况下,只有当模型特征数据的前方 包含 DS 字样时才可以被识别。如果模型是使用 Workbench 平台自带的 DM 模块建立的,则特 征数据的首字母默认为 DS,可全部被识别。

由于 Solidworks、UG、Pro/e 等三维机械设计软件在建模能力与操作易用性方面均远超 ANSYS 自带的 DM 模块或 SCDM 模块,因此笔者放弃了使用 DM 模块建立物理模型的方式, 而将 DM 模块仅用于模型导入、合并模型和建立点焊之用。当然,SCDM 模块修改与修复模 型的能力是非常强大的。

进行优化设计分析时,需要将模型的尺寸等特征数据被 Workbench 识别,并依照一定的优化算法迭代计算,找到最优解。而默认的其他软件(除 DM 模块外)建立的模型,由于特征数据的标题与 Workbench 的默认值 DS 不同,往往无法被识别。

单击 Geometry Import(模型导入),在右边的 Filtering Prefixes and Suffixes(首字母与下标过滤)文本框中将默认的 DS 字样删除。这样 Workbench 可将模型的全部特征参数识别,如图 1-12 所示。

Options	the second s	_     X
Options     Project Management     Appearance     Regional and Language Options     Graphics Interaction     Journals and Logs     Project Reporting     Solution Process     Subdivin Process	Palease Analysis Type 30 Basic Options 9 Solid Bodies	×
- Exe both s - Mechanical APDL - CFX - Repository - Fluent - Microsoft Office Excel - TurboSystem	Surface Bodies     Line Bodies     Material Properties     Parameters     Filtering Prefixes and Suffixes	
Meshing     Design Exploration     Design of Experiments     Response Surface     Sampling and Optimization     Geometry Import	CAD Attributes Filtering Prefixes SOFEA,DDM Named Selections	1

图 1-12 模型接口

如果需要进行参数化的特征数量较少,而模型特征数量极大,建议用户在设置如尺寸等 参数的时候将其修改成方便识别的名称。在大量的尺寸参数中找到需要进行参数化的特征,可 以将其修改成如图 1-13 所示的形式。

举个例子,将 Solidworks 软件中默认的尺寸特征 "D4@草图 2" 修改为 "D4 需要参数化 的@草图 2",尺寸数据为 70,单位为 mm。

将模型导入一个分析模块后单击 Geometry 下方相应的模型零件,即可在 Details of 1-1(模型 1-1 的详细信息)下的 CAD Parameters (CAD 参数化)下方找到刚刚修改的"D4 需要参数化的@草图 2",尺寸数据仍为 70,单位为 mm。已经被选择的参数化数据的前方也会出现蓝色的 P (Parameters,参数化)字样。再次单击它会删除选择,如图 1-14 所示。

🧳 尺	ব	?
~		
数值	引线其它	
样式(	5)	*
公差/	/精度(P)	*
主要	值(¥)	*
	D4需要参数化的@	草图2
-	70.00mm	



图 1-14 参数被识别



如果一个分析项目存在已选的参数化数据,回到项目管理区时会出现如图 1-15 所示的效果。在静力学分析模块下方增加了 B8 Parameters (参数化)。

定制化工具箱。如果购买了高级许可证,在 Toolbox (工具箱)中往往包含较多的模块图标。由于常用的模块并不多,为了看起来更加清爽,可以不显示部分模块的图标。

单击项目左下方的 Yiew All / Customize... (查看全部模块/定制) 按钮, 在右边弹出的 Toolbox Customization (定制化工具箱) 中勾选需要的图标, 如 Modal (模态分析模块)。关闭时单击 左下方的 Back (回退), 如图 1-16 所示。



图 1-15 参数化效果



第二个设置并行核心数量的位置:需要进入一个分析模块后方可设置。双击 Toolbox (工 具箱)中 Analysis Systems (分析系统)里的任意一个模块,如图 1-16 中的 Model (模态分析 模块)。再导入任意一个模型,以方便进入分析模块中进行设置。

打开模态分析模块后 Project Schematic (项目管理区)中会生成相应的分析模块,其中 A 代表第一个模块。

A1 的名称为 Model(模态分析模块),代表此模块用于进行模态分析; A2 Engineering Data (工程数据)内包含分析所需的材料属性的设置,Workbench 默认的材料为结构钢; A3 Geometry(模型)代表分析所用的物理模型,它可以是使用该模块(DM 模块)建立的,也可 以是从其他建模软件导入的; A4 Model(有限元模型)代表将物理模型离散化以建立适合分 析的有限元模型,通常称之为"画网格"; A5 Setup(荷载)代表加入到有限元模型上的荷载 与边界条件数据; A6 Solution(求解)求解设置与对有限元模型方程组的计算; A7 Results(结 果)对计算完成的结果进行提取和分析。从1到7,自上而下的顺序操作也是一个基本有限元 分析所需要的流程。

右击 A3 Geometry(模型)并选择 Import Geometry(导入模型),选择第 15 章性能试验台 子模型技术案例中使用的直线模块模型,单击"直线模块 s.X-T"文件,此处出现的几个模型 文件是在之前的分析中已被使用的,如果需要新添加则单击 Browse(浏览)选项进行,如图 1-17 所示。

双击 A4 Model(有限元模型)进入 Design Simulation(设计分析)模块。模态分析模块 属于 DS 模块的一部分,如图 1-18 所示。

进入后单击 DS 模块菜单栏上的 Tools(工具)→Solve Process Settings(求解过程设置),

如图 1-19 所示。



图 1-17 导入模型

	A	
👅 Mo	dal	
🥏 Enç	gineering Data	<
P Geo	ometry	~
🥥 Mo	del	2
🍓 Set	up	?
🍘 Sol	ution	?
🥑 Res	sults	?
	<ul> <li>Mo</li> <li>Enç</li> <li>Ger</li> <li>Mo</li> <li>Ger</li> <li>Sol</li> <li>Sol</li> <li>Res</li> </ul>	A Modal Calification Califi

第1章

图 1-18 进入 DS 模块

单击 Advanced (高级设置) 按钮,如图 1-20 所示。

Tools Help	Solve Process Settings	
Mrite Input File Read Result Files	My Computer My Computer, Back	
Solve Process Settings Addins	Add Remote	
⊘ Options Variable Manager	Rename Advanced.	
Run Macro	Delete OK Cancel	

图 1-19 求解过程设置

图 1-20 高级设置

设置核心使用数。在 Max Number of Utilized Processors (最大利用核心数)后方输入计算 机实际的物理核心数量,如图 1-21 所示。当计算机配备专用 GPU 加速卡以及相应的驱动程序 时,ANSYS 可通过调用 GPU 中远超过 CPU 的强大的浮点计算能力来帮助加速求解,需要 13.0 以上的 64 位版软件。在此设置 GPU 加速。当然,这受到软件功能限制和许可证对 GPU 加速 卡数量的限制。有关 GPU 加速求解的知识在第 29 章中详细介绍。

显示注解数量的设置。回到 DS 模块的菜单栏,单击图 1-19 中的 Options(设置)选项。 如果加载的荷载或约束大于 10 个,默认会仅仅显示前 10 个,而更多的无法显示,如图 1-22 所示,任意加载了 14 个边界条件与荷载后只能显示前 10 个。有时这会丢失一些数据。







图 1-22 默认的注解

单击 Options(设置) 左边的 Graphics(如图 1-22 所示),将 Max Number of Annotations to Show(最大显示的注解数量) 后方设置成更大的数值,此处更改为 50。设置后如图 1-24 所示,已全部显示了 14 个边界条件及荷载信息。

经过笔者测试,在笔记本 1366×768 分辨率屏幕下,受纵向分辨率限制,最多只能显示 23 个注解。如需显示更多,一种方法是将笔者台式机的 EIZO 牌 15 英寸 2048×1536 分辨率 液晶显示器旋转 90 度,并在系统设置中将显示分辨率设置成"纵向"。这样纵向分辨率达到了 2048 像素,为笔记本的约 3 倍,就可以显示更多的注解了。



图 1-23 最大注解数量



图 1-24 更改后的注解

注意:可能这是 ANSYS Workbench 15.0 中的一个 BUG, 其并没有考虑到可能在某项分析 中加载了数量较多的荷载与边界条件时注解的完整显示问题。在 16.0 中仍有此问题。

第三个设置并行核心数量的位置: 画网格时的多核心并行计算。15.0 之前的早期 Workbench 平台在划分网格的时候都只能调用 CPU 中的一个物理核心计算,这是一种无奈的 浪费。虽然早期版本也可以设置成多核心并行,但是并行效果不好,其划分效率与单核心差别 不大。在 Workbench 15.0 平台中,可以更好地调用更多的核心参与网格划分计算,使得前处 理操作效率大大提高。官方的宣传信息是"最大加速 27 倍"。

在 Options(设置)中,单击左边的 Meshing(网格),再单击下拉菜单 Meshing(网格), 在右边的 Number of CPUs for Meshing Methods(划网格使用的核心数量)和 Number of CPUs parallel Part Meshing(网格并行核心数)后方分别输入计算机的物理核心数量。由于笔者笔记 本 T6600 型号的 CPU 为双核心,此处设置为 2;笔者台式机 XEON E3 1230 V2 型号的 CPU 为四核心,此处设置为 4。设置完毕后单击 OK(确定)按钮,如图 1-25 所示。



图 1-25 并行设置

单击菜单栏上的 File (文件) → Close Mechanical (退出机械设计模块),如图 1-26 所示。 至此,完成了对软件的初始设置。

开始第一个静力学分析。本案例对某商用电梯的钢结构框架模型进行最基本的静力学分

析计算,通过加载重力加速度荷载并在两端和中间设置共计三组固定位移约束,以计算其在自重下的变形量。由于初学者最需要的是对工作流程的熟悉,因此本案例仅介绍最基本的操作。

更改模块。早在图 1-18 中已经打开了一个模态分析模块。 其与本案例需要的静力学分析不同,需要更换模块。一般可以 右击 A1 Model(模态分析模块)并在下拉菜单中选择 Deltree (删除)命令删除不需要的模块,再在 Toolbox(工具箱)中 拖拽出一个新的静力学分析模块。其实也可以直接在不需要的 模块上更改。

100

File Edit View Units	Tools
📔 🚱 Refresh All Data	
📙 🚽 Save Project	1
] Export	<u> </u>
🛾 🔄 Clear Generated Data	
Close Mechanical	

第1章

图 1-26 退出模块

右击模态分析模块左上角的黑色三角形图标处,在下拉菜单中单击 Replace(替换)→需要的 Static Sturctural (静力学分析模块),如图 1-27 所示。

更改模型。右击更换为静力学分析模块的 A3 Geometry(模型)项目,在下拉菜单中单击 Replace Geometry(替换模型)→Browse(浏览),如图 1-28 所示。



找到文件大小为 640KB 的总装配体模型,单击"打开"按钮,如图 1-29 所示。导入后模型如图 1-30 所示。



图 1-29 打开模型

另一种导入模型的方式。需要安装三维软件(如 Solidworks 等)与 Workbench 15.0 之间 的模型接口,并且需要专用的许可证。

打开模型。打开 Solidworks 软件和需要的模型,单击菜单栏上的 ANSYS 15.0→ANSYS Workbench, 如图 1-31 所示。



图 1-30 导入后的效果



图 1-31 另一种导入方法

第三种方式是通过 DM 模块打开。

稍等几分钟后 Workbench 15.0 打开并在 Project Schematic (项目管理区)下生成一个 Geometry(模型)。单击 Toolbox(工具箱)下方的 Static Structural(静力学分析模块),将其 拖动到 A1 Geometry(模型)中。这会自动将刚刚导入的模型文件与静力学分析连接,如图 1-32 所示。之后会在右边生成一个 B1 Static Structural (静力学分析模块)。



图 1-32 打开静力分析

划分网格。双击 B4 Model (有限元模型),如图 1-33 所示。由于模型零件较多,导入过 程花费了近 10 分钟。图 1-34 所示为导入进度和 CPU 使用率。最新版的 Workbench 15.0 的并 行计算能力得到了提升,在之前版本尤其是14.0之前,该过程一般只能使一个核心100%运行, 而其他核心相对闲置,15.0 中大部分时候可以让更多的核心满负荷运行。由图 1-34 可见,导 入过程中的大部分时间 CPU 占用率都在 70%以上。在此计算机平台下导入模型,几乎可比之 前的版本快一倍。进度条下方的"F0103001"字样代表了正在导入的模型零件名。

直接导入由 Solidworks 软件创建的装配体模型,其包含的数据量较大。在不执行优化设 计分析时,也可以考虑将其另存为 X-t(Parasolid) 或 Igs 等中间格式。这样模型文件更小, 导入速度也会快很多倍。

注意:对于多个零件的模型而言,导入后零件之间的连接关系会被 Workbench 默认地使用 绑定接触连接。当接触数量很多时会极大地增加运算量,而且零件间的网格节点也不连续,非 常容易出现应力奇异现象。为了降低计算量,可以在 DM 模块中选中适当的零件,再使用 Form

iect Scher 1 1 777 2 2 Geometry Regineering Data 1 Geometry Geometry Model 2 ? . Setup 7 🖌 6 Solution ? Results Static Structural

New Part (合并为新部件)。详细的操作过程将在第 20 章压力容器弹塑性分析案例中介绍。



图 1-34 导入进度

案例仅做演示,划分网格时暂时设置一个全局网格尺寸。进入模块后单击 Outline(分析树)下方的 Mesh(网格),向下在 Details of Mesh(网格的详细信息)下方点开 Sizeing(网尺寸),在下方的 Element Size(单元尺寸)后方输入 50mm,单击菜单栏上的 Update(刷新网格)按钮,如图 1-35 所示。

注意: Outline (分析树) 为用户提供了一个模型的分析过程,包括模型、材料、网格、 荷载和求解管理等。

与导入模型中的多核心并行运行类似,多核心并行划分网格功能也是 Workbench 15.0 的 重要革新。它可以在大部分时间里让 CPU 满负荷参与计算,极大地提高了效率。网格划分过 程如图 1-36 所示。



图 1-35 刷新网格



划分完成后可以查看网格数量统计信息。单击 Outline (分析树)中的 Mesh (有限元模型), 然后打开 Details of Mesh (网格的详细信息)最下方的 Statistics (网格统计),可以看到该有限 元模型的 Nodes (节点数)为 875864 个, Elements (单元数)为 159696 个,属于中等规模, 如图 1-37 所示。划分后的网格经过局部放大后如图 1-38 所示。

注意:要在 Workbench 平台的各个模块下局部放大显示模型,可以在模型空间处右击并拖动划出需要局部放大部分的矩形框,然后放开鼠标。如果拖动的矩形框有一部分位于左上角

Contraction of the

第1章

图 1-33 划分网格

的项目标题附近,则会毫无放大反应,请将矩形框适当远离标题。放大模型也可以使用滚动鼠 标滚轮的方法。

		<b>q</b>			
F	'ilter: Name				
	Coordina Connecti Mesh Conscti	e Systems  ons tructural (B5)			
De	tails of "Mesh"	9			
+	Defaults				
+	Sizing				
+	Inflation				
+	Patch Conforming	Options			
+	Patch Independent Options				
+	1 dwanced				
+	Defeaturing				
Ξ	Statistics				
	Nodes	875864			
	Elements	159696			
	Mesh Metric	None			

图 1-37 网格数量



图 1-38 划分后的网格

加载重力。单击 Outline(分析树)下方的 Static Structural(静力学分析),再单击菜单栏 上的 Inertial (惯性荷载)→Standard Earth Gravity (标准地球重力),如图 1-39 所示。图 1-40 所示为默认重力加速度加载的方向。其与本案例中需要的相反,需要将其反向旋转。







图 1-40 自重方向

注意: Workbench 平台下自重加载后的箭头方向与经典版 ANSYS 中的不同。在经典版中 是加载一个方向向上的加速度效应,以模拟重力产生的向下的力;而在 Workbench 平台中, 改为更符合常识的向下加载。

更改重力方向。单击 Details of Standard Earth Gravity(标准地球重力的详细信息)中的 Direction (方向), 下拉选择+Z, 如图 1-41 所示。

注意: 该方向以模型坐标系为准。坐标方向需要参考模型空间右下角。

图 1-42 所示为更改后的方向,其与实际相同,更改成功。

施加约束。在电梯框架两端分别施加固定位移约束,并在框架接近中部的支撑面上施加 另一个固定位移约束,以模拟其实际的连接固定状态。

单击 Outline(分析树)下方的 Static Structural(静力学分析),按住 Ctrl 键分别单击框架 顶部的两个固定面,单击菜单栏上的 Supports (支撑)→Fixed Support (固定位移约束),如

第1章

图 1-43 所示。



图 1-41 更改方向

图 1-42 更改成功

注意:固定位移约束是将约束所属范围内全部方向的自由度约束。如与实际状态不同, 需要使用其他方式的约束。



图 1-43 施加约束

下面列出一些约束的解释。

Displacement(位移约束):用于在顶点、边或者面上给定已知的位移,允许在X、Y、Z 方向给予强制位移。输入0代表此方向被约束。不设定某方向(显示 Free)意味着该方向可 以自由运动。

Remote Displacement (远端位移): 允许在远端加载平动和旋转位移,默认位置为几何模型的质心,可以使用整体坐标系或局部坐标系。

Frictionless Support (无摩擦约束):在面上施加法向约束。

Compression Only Support (只压缩约束): 在给定的表面施加法向仅有压缩的约束。由于 不确定是否存在压缩面的行为,需要迭代求解判断哪个表面表示了压缩行为,为非线性问题。

Cylindrical Support(圆柱约束): 施加在圆柱表面,可以指定轴向、径向或切向约束。该 约束仅用于线性分析。

Simply Support (简支约束): 仅用于面体或线体模型的 3D 模拟,可以施加在梁或壳的边 或顶点上,限制平移,但是所有旋转都是自由的。

Fixed Rotation (固定转动约束):可以施加在壳或梁的顶点、边或表面上,约束旋转但不限制平移。

C C C C C

Elastic Support (弹性支撑约束):允许在面或边上根据弹簧行为产生移动或形变。弹性支撑基于定义的基础刚度,即产生基础单位法向变形的压力值。

在模型底部表面同样施加一组固定位移约束,如图 1-44 所示。模型中部的约束,为了节约篇幅暂不介绍,其加载方法同上。

本案例仅查看自重下的变形值。单击 Outline(分析树)下方的 Solution(分析),再单击 菜单栏上的 Deformation(变形)→Total(总变形),如图 1-45 所示。



图 1-44 另一个约束



图 1-45 变形结果

准备工作已经完成,保存项目文件再进行求解。单击 File(文件)→Save Project(保存项目文件),如图 1-46 所示。

由于有限元分析过程中或者结束后会形成巨大的结果文件,故需要将项目文件保存在磁 盘空间较大的位置。一般留有 100GB 的空间即可满足绝大多数的情况。

在弹出的对话框中暂时将项目名保存为2,单击"保存"按钮,如图1-47所示。



图 1-46 保存文件



图 1-47 命名并保存

检查各项设置无误后单击菜单栏上的 Solve(求解)按钮。依照分析规模和计算机硬件的 不同,小规模分析的求解时间以分钟为单位计时;大规模分析时,以小时或天为单位,如图 1-48 所示。

求解过程中或完成后可以查看求解信息。单击 Outline(分析树)下的 Solution Information (求解信息),在右边的 Worksheet(工作表)中可以查看求解进度和错误信息,如图 1-49 所示。

尤其是计算报错,提示 error (错误)时,仔细查看非常冗长的求解信息是找到错误原因 和解决错误的重要渠道。



	, 电梯框架静力学分析案(
[ANSYS Bultiphysics]	
→ Solve - ?/Show Errors ?/Review Model Solves the analysis or analyses using a setting	l (Beta) 🏥 👪 🔀 : g a given solve process
Stress + 📽 Endown Colors 🐼 Annotation Preferen	ices   🤹  ] 🚻 Edge Col

图 1-48 求解

在 Worksheet(工作表)最下方显示了求解时间等信息。其中 Maxmum total memory allocated (最大内存分配数)为 9808MB,约为 10GB。这意味着本计算至少需要配备 16GB 内存的计算机才可以保证内存有足够的空闲空间用于求解(相对地,硬盘、光盘、U 盘等属于外存),而不出现性能瓶颈,严重拖累其他高速部件性能的发挥,浪费宝贵时间的情况; Elapsed Time (消耗的时间)是查看求解消耗多少时间的重要信息。该计算在笔者 XEON E3 1230 V2 版本 CPU 和双通道 16GB 内存台式机上的求解时间为 2603 秒,约 43 分钟,如图 1-50 所示。

经验表明,使用隐式算法时,许多问题的计算成本大致与自由度数的平方成正比,而且 磁盘空间和内存需求和以相同方式增长;使用显式算法时,计算时间与单元数量成正比,且大 致与最小单元尺寸成反比,而磁盘空间和内存需求与单元数量成正比,而与单元尺寸无关。用 户可以根据实际情况进行估计。







结果处理。为了让很微小的结构变形显得更明显,可以使用"放大"功能。单击 Outline (分析树)下方的 Total Deformation(总变形),再单击 Result(结果)后方的下拉菜单。也可 以直接在空白处输入放大比例的系数。该处为放大 5.7e003=5700 倍,如图 1-51 所示。

图 1-52 所示为放大后的变形情况。其最大变形量为 0.44414mm。由于中部有约束的存在,整体变形呈现"阶梯"状。在 ANSYS 中,总的变形结果等于 X、Y、Z 三个方向变形值平方的和的开方。

也可以显示模型未变形时的轮廓和最大值的位置。单击菜单栏上 Show Undeformed Model (显示未变形模型) 右侧的 Max (最大值) 图标。如模型较为复杂,则开启此模式所需要的 生成时间稍长,如图 1-53 所示。如果需要查看任意点的变形值,则可以单击右边的 Probe (探

17

· · ·

第1章

针),在模型感兴趣的位置单击,即可显示该点的变形值。



图 1-51 放大比例

图 1-54 所示为该后处理的效果。



图 1-52 变形结果



保存并退出。计算完成,单击 File(文件)→Save Project(保存项目文件)→Close Mechanical (关闭机械设计模块),如图 1-55 所示。



图 1-55 保存并退出

## 回到项目管理区,单击 File(文件)→Exit(退出),如图 1-56 所示。

-



图 1-56 退出平台

如果项目文件稍有改变, 在退出 Workbench 平台时还会提示一次保存, 应单击 Yes (确认 保存) 按钮, 如图 1-57 所示。

ABSTS To	kbench	
0		
🔼 The	current project has been modified. Do you want	to save it?
A The	current project has been modified. Do you want	to save it?

图 1-57 确认保存

图 1-58 所示为使用 14.5 版本的 Workbench 平台对相同模型划分网格时的 CPU 使用率。 网格划分的大部分时间可让笔记本的双核心 CPU 使用率保持在 60%左右。与图 1-36 的几乎全 负荷运行比较,该版本对 CPU 计算能力的利用率低于 15.0 的水平。

M	A = 5	Static St	- Findows 任务	管理器			
F	ile 1	Edit View	文件(F) 选项(0)	查看(V) 帮助(	0		
14	2	1 \$ So	应用程序 进程	服务 性制	1 联网	用户	🤕 - 🕖 Yorkal
1,	J Shot	• Vertices	- CPII 使田室-		e		In Thicke
Œ	P h	****	).	TAX AM		think	2 10 10
041	line		64 X			A MILLI	ANSVS
F	ilter;	Nane	• 内存	物理内存使用	记录		RIA S
	Proj	Model (A	4) 3.49.68				
	•	Coor Conr Mest Conr	dir not 小物理内存(MB) 总数 ic 已獲存 ic 可用 A 空闲	8158 4155 4581 472	系统 句柄数 线程数 开机时间	9724 155 7 0:21:51:5	15 16 19
4	ĺ.		▶ 核心内存 (NB)		提交(GB)	4 / 1	5
Bet	1111	of "Nesh"	分页数	276	2015	101.55 (P)	
	Defat	lts	*75贝	130		0(62 (4)	
	Ph	Mechanic	1		Calue of Plants	-	
4	88	U		CPU 使用率: 64%	物理内	存: 43%	11.
	lis	Off	USIS Torkbench U	pdate Bodel St	atus		×
	Re	Coarse	Generating mesh for	F0103001_ASM_	1-1-1@F01030	023_1-1-7 ( 24	/ Y
	E1	60.0 nn	105 )				- 1
	In	Active a	Description has sounded by				
	Sn	Medium	Preparing to model c	oundary for part			
Sec	tion	Flues		Stop	1		
16	1 0	XA					# ×
P		S W. 1.					C . 1 . W

图 1-58 老版本划分网格



注意:有限元工程师的四种境界类似于《道德经》中所说的道、法、术、器。道:为规律、理念、信念;法:为正式颁布的成文法律以及惩罚制度;术:是君主驾驭臣民,使之服从于统治的政治权术;器:为所使用的工具和手段。道以明向,法以立本,术以立策,器以成事。

《易经·系辞》中有"形而上者谓之道,形而下者谓之器。"道而虚,器则实。对于结构 工程师而言,力学原理、有限元原理、振动理论等是道,各种计算软件和硬件为器。以道驭器, 方能得心应手,以不变应万变。只注重"器"的技法,而不总结升华为"道",未免有些盲目, 有些低效率。对于软件,此器非彼器,所以操作上有着些许的差别。通过熟悉器来逐渐捉摸道, 继而达到以道驭器,才是更高层次的境界。力学为本,软件为用,本立则道生。而术和法都是 中间层级的境界。

只热衷于在软件中如何点选鼠标是舍本逐末的雕虫小技,但又是初学者的必经之路。以 此之上,掌之其道,方能游刃有余。

保存项目文件,退出 Workbench 15.0 平台。 至此,本案例完。