



开源 CAE

Introduction and Application of
Open Source CAE Software

数值仿真模拟软件
介绍与应用

田春来 著



作者简介：

田春来（1985—），男，工学博士，高级工程师，副教授，河北石家庄人。现任萍乡学院机械电子工程学院副院长，机械工程系主任。2003年9月至2012年7月，就读于北京理工大学机械与车辆学院。2012年7月博士研究生毕业于动力机械及工程专业。英国纽卡斯尔大学访问博士研究生，访问学者。

主持国家重点研发计划课题及省级课题多项，发表学术论文三十余篇，获国家发明专利5项，完成软件著作权登记18项，多次受邀参加国际学术会议，并做主旨报告。现主持萍乡学院机械工程特色专业建设，主持教育部产学研合作协同育人项目2项。

研究领域为环保装备及新能源动力系统设计。研究方向为机械工程现代设计方法，重点围绕传热传质及复杂过程控制系统展开，包括相关机械装备设计与优化、热工水力试验方法和先进数值模拟技术应用研究，以及高性能数值计算程序开发及工程应用等。

开源 CAE 数值仿真模拟软件 介绍与应用综述

田春来 著

 江西科学技术出版社

**本书所述相关研究工作和出版获得了国家核电技术公司员工
自主创新课题资助(项目编号:SNP – KJ – CX – 2013 – 10)。**

内容简介

计算机辅助工程(Computer Aided Engineer,CAE)技术是现代设计方法的重要组成部分。相比商业 CAE 软件,应用开源 CAE 软件开展相关工作具有代码开放、免费和不受用户限制等显著优势。开源 CAE 软件为工程数值计算与仿真及相关先进数值模拟应用技术研究提供了良好基础。

为推动 CAE 技术及先进数值模拟技术的发展,特别是推广开源软件在 CAE 工程数值模拟与仿真方面的应用,本书罗列了当前通用的 30 款开源 CAE 软件,系统地综述了各软件功能特点和技术特色,并通过示例介绍了各软件基本使用流程,方便读者了解和掌握软件基本使用。

前言

计算机辅助工程(Computer Aided Engineer, CAE)技术是现代设计方法的重要组成部分。其中,面向设计的工程数值计算与仿真分析及先进数值模拟技术是 CAE 技术的核心之一。开源软件是一类采用开放源代码方式、依据开源软件协议发布的软件。在 CAE 工程数值计算与仿真分析方面,现有众多开源 CAE 软件。相比商业 CAE 软件,应用开源软件开展相关工作具有免费和不受用户限制等优势。特别是利用其源代码完全开放,使用者可以实现代码级定制开发,满足自身特色工程应用和理论研究需要。可以认为,开源 CAE 软件为工程数值计算与仿真,及相关先进数值模拟应用技术研究,提供了良好基础。

为了有助于推动 CAE 技术及先进数值模拟技术的发展,特别是推广开源软件在 CAE 工程数值模拟与仿真方面的应用,本书全面罗列了当前通用的 30 款开源 CAE 软件,系统地综述了各软件功能特点和技术特色等,并通过示例介绍了各软件基本使用流程,方便读者了解和掌握软件基本使用。

本书介绍的软件按功能分类主要包括了 CAD 几何建模(例如 SALOME 和 FreeCAD)、前后处理及网格划分(例如 Gmsh 和 ParaView)、求解器和科学计算集成软件(例如 Scilab 和 wxMaxima)。其中,求解器主要包括了用于 PDE、CFD 和 FEA 的数值求解程序(例如 OpenFOAM、Code_Aster、deal.II 和 Elmer)。

希望通过本书的简要介绍和对各类软件技术特点的综述,能够让更多的读者,特别是 CAE 工程师及相关工程数学仿真、先进数值模拟技术应用研究与基础理论研究人员了解这些开源的 CAE 软件,了解国外在 CAE 技术特别是开源 CAE 软件方面的进展和已有软件成果。以期在此基础上,提高自身研究能力和学术水平,推动国内 CAE 软件产业化、自主化发展。

目 录

1	CAELinux	1
2	LibreCAD	8
3	PythonCAD	13
4	SagCAD	18
5	QCAD	23
6	FreeCAD	28
7	Blender	36
8	SALOME	40
9	Gmsh	47
10	enGrid	54
11	Netgen	61
12	Discretizer	68
13	HELYX - OS	74
14	ParaView	78
15	Code_Aster	84
16	CalculiX	88
17	FreeFEM+ +	96

18	Impact	100
19	SU2	105
20	OpenFVM	112
21	Elmer	118
22	deal.II	126
23	Gerris	133
24	OpenFOAM	138
25	Scilab	152
26	Octave	164
27	Maxima/wxMaxima	170
28	OpenModelica	178
29	R/RKward	188
30	NumPy/SciPy	199

1 CAELinux

为 CAE 量身定制的 Linux 发行版操作系统

1.1 功能与特点

CAELinux 是一款特色的 Linux 发行版操作系统。它致力于 CAE 应用,基于 Linux 操作系统,预先集成并配置了众多已有的开源 CAE 软件或程序包(也包括 CAD/CAM/CFD/FEA/EDA 等)。用户在该操作系统中,可以利用相应软件开展计算机辅助几何建模、网格划分及前处理、仿真计算与分析模拟和后处理及可视化等各种 CAE 工作。

利用已有的前后处理和求解器(例如 Code_Aster, Code - Saturne, OpenFOAM, Elmer, Calculix 和 Impact 等),可以为多物理场的 CAE 问题提供基于开源软件的解决方案,包括非线性热流固耦合、多体与非线性显式动力学、接触与弹塑性 FEA、计算流体力学、计算传热学和电磁学等。

CAELinux 主要特点概括如下:

- (1) 基于 Linux 操作系统,集成有众多开源 CAE 软件并已配置完毕,系统安装配置灵活、方便;
- (2) 支持全面的 CAE 工程应用(包括 CAD/CAM/CFD/FEA/EDA 等);
- (3) 完全开源,众多 CAE 软件采用 GPL 或 LGPL 协议,为广大 CAE 用户提供了广阔的应用空间;
- (4) 支持移动存储介质(LiveDVD 或 USB) 直接启动运行操作系统;
- (5) 安装完成的 CAELinux 系统,即可以作为一般桌面操作系统满足日常需要,也可以作为专门的 CAE 工作站;
- (6) 持续的开发计划,可以确保操作系统及各软件功能始终保持领先。

正是由于 CAELinux 专门集成了众多开源的 CAE 软件,因此,它才可以被称为致力于 CAE 应用的具有特色的 Linux 发行版。借助众多开源 CAE 软件的优势特点,CAE-Linux 针对 CAE 的功能可以说是强大且全面的。以最新稳定版本 CAELinux 2013 为例,

其包含或集成的软件列表及主要功能如表 1-1 所列。

表 1-1 CAELinux 主要集成软件及其功能

应用分类	软件名称	核心功能
CAD 应用	LibreCad	二维 CAD
	SagCad	二维 CAD
	FreeCAD	三维参数化 CAD/前处理
	Salome	三维 CAD/前后处理
	Blender	三维建模
	OpenSCAD	三维 CAD
CAM 应用	PyCAM	CAM
	GCAM	CAM G 代码生成
	Dxf2Gcode	G 代码生成
	Inkscape Gcodetools	G 代码生成
	Cura	3D 打印
CAE 前后处理	Salome Meca	前后处理集成平台
	GMSH	前后处理集成工具
	Netgen	通用网格划分及前处理
	Tetgen	通用网格划分及前处理
	ElmerGUI	Elmer 求解器用户界面
	enGrid	非结构化网格划分
	Meshlab	三角形网格划分
	Helyx - OS	用于 OpenFOAM 的前处理窗体
	Discretizer/:: Setup	用于 OpenFOAM 的前处理窗体
	Paraview 3.10	后处理可视化软件
CAE 求解器	Code_Aster	多物理场 FEM 求解器
	Elmer	多物理场 FEM 求解器
	Calculix	多物理场 FEM 求解器及前处理工具
	Impact FEM	显式 FEM 动力学求解器
	OpenFOAM	CFD 求解器
	Code - Saturne	CFD 求解器
	Gerris flow solver	CFD 求解器
多体动力学	MBDyn	多体动力学求解器

续表

应用分类	软件名称	核心功能
电子	Kicad	PCB 设计
	gEDA suite	电子电路、PCB 设计
	PCB Dsigner	PCB 设计
科学计算	Octave	数值计算及编程工具箱(类似 Matlab)
	Scilab	数值计算、编程及仿真工具箱(类似 Matlab)
	wxMaxima	数学符号计算工具箱(类似 Maple)
	Rkward	数学建模与统计分析工具箱(类似 SPSS)
	Python Scipy	Python 的科学及数值计算库
	Gnuplot	科学绘图工具
	Amazon EZ2 Cloud	云计算基础工具箱(地区限制)

从表 1-1 中可以看到,CAELinux 为用户集成了众多的开源 CAE 软件,这些软件不仅功能全面,而且各有特点和优势。利用其中单独的软件或多个软件配合使用,可以完成大量的 CAE 工作,满足不同用户、不同方面、不同层次的需求。因此,在这里我们首先介绍了 CAELinux。由于软件众多、技术条件限制等各种原因,CAELinux 并没有试图包含全部的开源 CAE 软件。用户还可以选择很多其他具有特色的开源 CAE 软件,例如后面将介绍的 Blender 和 Open Modelica 等,或是基于现有的开源程序库,或是开发满足自身特殊需要的软件。

通过以上我们可以看到,不论是否采用 CAELinux 及其已带有的众多软件,还是用户自己定制安装所需要的软件,都可以实现 CAE 的工作应用。现有的开源 CAE 软件具备了完整的工具链。正如开篇所述,尽管使用开源 CAE 软件及相应的技术进行工作还存在这样或那样不足,但是,与商业 CAE 软件相比,使用开源 CAE 软件及开展相应技术研究工作是具有显著优势的。

综上所述,CAELinux 作为具有特色的 Linux 发行版操作系统,通过预先集成和配置好众多的开源 CAE 软件,极大地方便了用户入门、使用,在功能上得到了进一步提高,并且在一定程度上推动了开源 CAE 软件的应用和普及。

1.2 起源与发展

CAELinux 自 2005 年起开始发布,开发起初主要是为了集成应用开源 CAE 软件 SA-

LOME 和 Code_Aster。随着开发深入,开发团队为了满足更广泛的 CAE 用户需求,于是将 Linux 操作系统移植到新平台下,并集成了众多现有的开源 CAE 软件,逐渐形成了具有功能规模的开源 CAE 应用软件平台,最终将其作为一款特色的 Linux 发行版操作系统发布,并持续保持维护和更新。

CAELinux 最新稳定版本为 CAELinux 2013,于 2014 年 3 月 9 日发布,基于 Xubuntu 12.04 LTS 64 位操作系统。各历史版本信息如表 1-2 所列。

表 1-2 CAELinux 发布历史

版本	发行时间	基础系统
CAELinux 2013	2014 年 3 月 9 日	Xubuntu 12.04 LTS 64 位
CAELinux 2011	2011 年 10 月	Ubuntu 10.04.3 LTS 64 位
CAELinux 2010	2010 年 9 月	Ubuntu 10.04 LTS 64 位
CAELinux 2009	2009 年 6 月	Ubuntu 8.04 LTS 64 位
CAELinux 2008	2008 年 4 月	PCLinuxOS 2007
CAELinux 2007	2007 年 4 月 13 日	PCLinuxOS 2007
CAELinux Beta 3b	2007 年 4 月	PCLinuxOS P. 93
CAELinux Beta 3a	2006 年 4 月	PCLinuxOS P. 92
CAELinux Beta 1	2005 年 10 月	PCLinuxOS P. 91

1.3 安装

CAELinux 是一款基于 Xubuntu/Ubuntu 操作系统的 Linux 发行版操作系统。因此,依照 Xubuntu/Ubuntu 操作系统的安装步骤,即可完成 CAELinux 系统安装。具体步骤包括:

(1) 获取 CAELinux 操作系统安装文件。通过在线资源下载操作系统安装文件(ISO 镜像文件)到本机。可以利用检验文件的 MD5 信息,确保下载文件完整和正确。

(2) 刻录操作系统镜像文件光盘或创建系统安装 USB。使用光盘刻录软件将镜像文件采用镜像刻录方式,刻录到 DVD 光盘中,制作操作系统安装光盘;或者使用 USB 启动盘制作软件,利用 ISO 镜像文件创建操作系统启动 USB。

(3) 使用系统安装光盘或系统安装 USB 启动计算机。插入光盘或 USB,选择使用光盘或 USB 启动计算机(必要时需要修改计算机 BIOS 启动选项)。

(4) 通过 CAELinux 启动计算机后,进入操作系统安装用户界面,依据提示进行后续安装操作。具体安装操作可以参考在线资源的 CAELinux 安装说明和 Ubuntu 安装手册

及步骤教程。

(5) 根据 CAELinux 安装说明,由于预先配置了大量的 CAE 软件,因此,建议硬盘安装 CAELinux 时,主分区至少需要 20 Gb 的硬盘空间。对于内存配置较低的用户,建议设置 4 Gb 的交换分区(Linux Swap)。

(6) 安装完成后,系统重新启动即可进入操作系统及 Xfce 桌面环境。

在第四步计算机启动后,进入操作系统安装用户界面,用户此时可以选择试用操作系统。在试用操作系统过程中,用户也可以完成一些基本的 CAE 操作和应用。

另外,对于预先已安装有其他操作系统的计算机,通过安装过程的选择可以实现多操作系统的并存。需要提醒的是,操作系统安装是一项风险较大的操作,建议一般用户仔细阅读在线的安装说明,事先备份,谨慎操作。

1.4 开始使用

CAELinux 支持移动存储介质运行,即可以通过 LiveDVD 或 USB 启动计算机,并直接运行操作系统和相应软件,不需要完整的安装操作系统。用户可以尝试体验一下。

以完整安装的 CAELinux 2013 使用为例。系统启动后,进入桌面环境。如图 1-1 所示。由于 CAELinux 2013 以 Xubuntu 12.04 为基础,采用了 Xfce 4 桌面环境。Xfce 是一种开源的 Linux 桌面环境,具有快速、轻量、美观和方便交互使用的特点,其使用率仅次于 KDE(如 Kubuntu)与 GNOME(如 Ubuntu)。通过点击应用菜单(Application),可以看到当前系统已经安装了众多的 CAE 软件。通过点击各种菜单及快捷方式就可以启动相应软件。

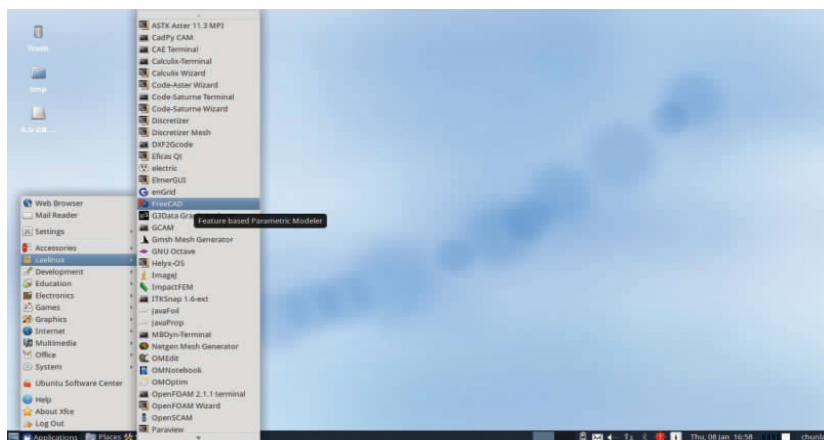


图 1-1 CAELinux 2013 Xfce 桌面环境

在 CAELinux 系统中,可以根据用户喜好轻松的自定义各种桌面物项,包括任务栏、菜单栏和快捷工具栏的位置、布局、大小和内容等。与系统安装默认的桌面环境相比,图 1-1 所示的桌面隐藏了快捷工具栏,将任务栏和菜单栏合并放在了桌面的底部,桌面背景也做了调整。

通过文件浏览器进入 `/opt` 目录,可以看到预先安装的各种软件,如图 1-2 所示。目录中包括了 OpenFOAM, Calculix, Elmer, Aster, Satime, Salome - Meca, Impact 和 Tetgen 等。另外,还有一些其他的软件或程序安装在其他位置,通过查找方式可以找到相关的程序或命令。



图 1-2 CAELinux 2013 `/opt` 目录

安装 CAELinux 后可以发现,前面提到的众多软件均已经自动安装和配置完成,用户可以直接的使用。这也大大提高了用户使用便捷性,体现了 CAELinux 致力于 CAE 的显著特色。

另外,作为一个基于 Xubuntu 操作系统的发行版,CAELinux 也同样具有原操作系统的各种功能。例如,通过 Ubuntu 软件中心,可以搜索、安装和卸载各种软件,也可以使用 `apt-get` 方式更新、获取、安装和配置各种软件。同时,作为一个独立的操作系统,还具有了文本编辑、图像视频处理、网络浏览、文件资源管理、硬件配置管理和用户管理等各种功能,基本能够满足日常工作需要。

1.5 在线资源

<http://sourceforge.net/projects/caelinux>

<http://www.caelinux.com>

<http://www.caelinux.org>

<http://xubuntu.org>

<https://help.ubuntu.com/community/GraphicalInstall>

<http://www.ubuntu.com>

2 LibreCAD

二维 CAD 软件

2.1 功能与特点

LibreCAD 是一款二维 CAD 应用软件。该软件支持绝大多数操作系统,主要包括 Microsoft Windows, Mac OS X 和 Linux (Debian, Ubuntu, Fedora, Mandriva, FreeBSD 和 SUSE 等), 并提供近 20 多种用户界面语言支持。

LibreCAD 是具有全面的二维 CAD 功能,具体包括:

- (1) 支持二维 CAD 设计,包括基本几何图形绘制、标注和约束等;
- (2) 支持库文件调用、绘图块操作和图层操作;
- (3) 支持 DXF 格式数据文件交换;
- (4) 支持导入 raw 几何数据文件;
- (5) 支持输出 PDF 文件和外部打印机;
- (6) 支持用户界面自定义;
- (7) 支持中文字体。

主要特点包括:

- (1) 采用 GPLv2;
- (2) 支持大多数语言环境,并持续开发;
- (3) 具有跨平台版本,支持绝大多数操作系统。

2.2 起源与发展

追溯起源,LibreCAD 最早作为 Qcad 开源的社区版本,用于补充 Qcad 的 CAM 功能。随着 Qcad 从 Qt3 平台移植到 Qt4 平台,LibreCAD 的前身 CADuntu 开发完成。不久,CADuntu 更名为 LibreCAD,并于 2011 年 12 月正式发布了 1.0 版。随着开发的持续,在 2.0

以上版本的 LibreCAD 已经完全实现了在 Qt4 平台的移植。

目前,LibreCAD 软件最新版本是 2.0.7(2015 年 1 月 3 日)。开发团队正在向 Qt5 移植软件。

2.3 安装

以 Ubuntu 系统安装 LibreCAD 为例。通过系统软件中心(Ubuntu Software Center) 搜索 LibreCAD,可以方便地进行安装自动配置(如图 2-1 所示)。

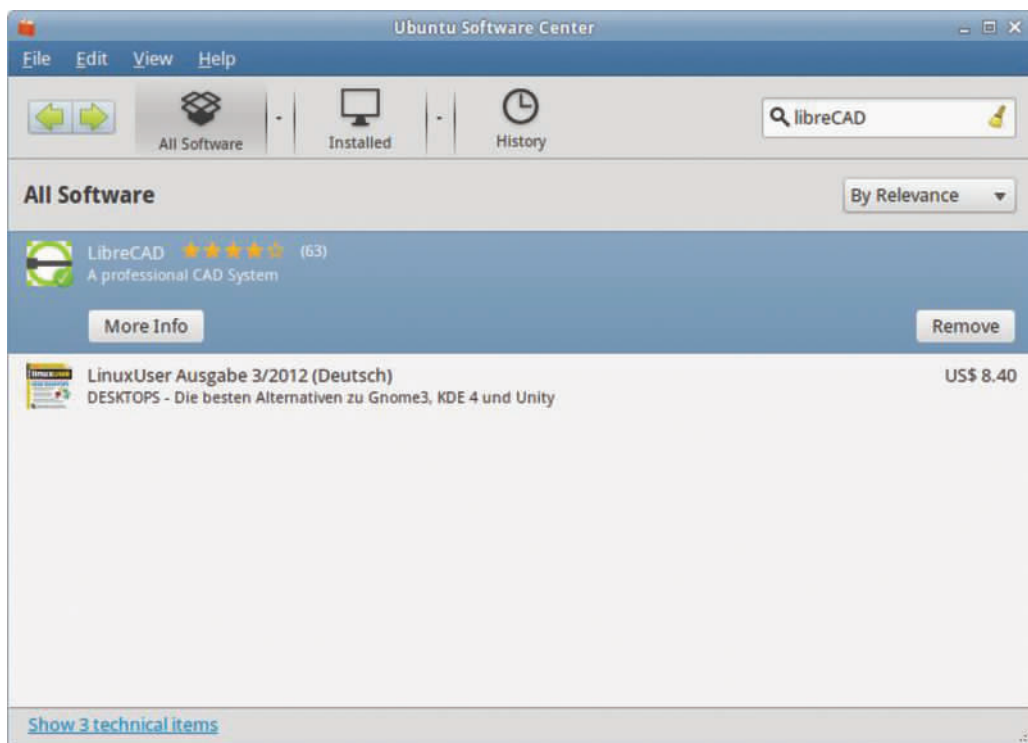


图 2-1 软件中心安装

另外,通过 `apt-get install` 方式也可完成软件安装。采用该 `apt-get` 安装方式时,需先安装完成 Qt4 及其依赖软件。具体是在终端执行:

```
$ sudo apt-get install g++ gcc make git-core libqt4-dev qt4-qmake libqt4-help qt4-dev-tools libboost-all-dev libmuparser-dev libfreetype6-dev pkg-config
```

Qt4 安装完成后,在终端执行安装 LibreCAD: