

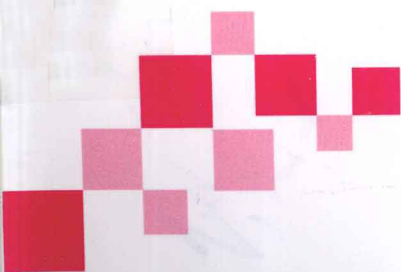
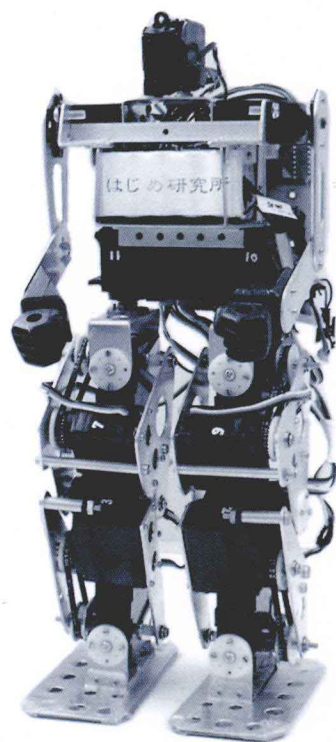
双足步行 机器人 仿真设计



YZLI0890168394

[日] ROBO-ON

杨 洋 杨斯爽 译



科学出版社

双足步行机器人仿真设计

[日] ROBO-ONE 委员会 编
杨 洋 杨斯爽 译

科学出版社

北京

图字：01-2011-7156号

内 容 简 介

本书面向 ROBO-ONE on PC 双足步行机器人仿真大赛，主要介绍使用 CAD 设计软件 Autodesk Inventor、分析软件 MSC.visualNastran 4D、控制仿真软件 MATLAB/ Simulink，进行双足步行机器人的 CAD 建模、机构和结构分析、控制以及协同仿真的步骤和方法。同时，以历届比赛中取得优胜奖的 5 件作品为例，介绍了双足步行机器人设计与开发中的成功经验和技巧。

本书有助于高等院校师生和参加相关机器人大赛的爱好者了解和学习相关知识，也可作为从事机器人设计和开发人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

双足步行机器人仿真设计/ (日) ROBO-ONE委员会编; 杨洋, 杨斯爽译. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035703-8

I. 双… II. ①R…②杨…③杨… III. 机器人-仿真设计 IV. TP242

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第235644号

责任编辑: 喻永光 杨 凯 / 责任制作: 董立颖 魏 谨
责任印制: 赵德静 / 封面设计: 林一帆

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏立印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—5 000 字数: 284 000

定价: 38.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)





目录

第 1 章 基于模型的集成开发	1
1.1 什么是集成开发	2
1.2 机器人开发的流程	2
1.3 CAD	3
1.4 CAE	4
1.4.1 结构分析	4
1.4.2 机构分析	4
1.5 Simulink	5
1.5.1 MBD	5
1.5.2 Simulink简介	5
1.5.3 与MSC.visualNastran 4D的协同	5
1.5.4 实时工作间嵌入式代码	5
第 2 章 三维CAD系统	7
2.1 三维CAD简介	8
2.2 Inventor 的使用	9
2.3 机器人部件设计	9
2.3.1 绘图	9
2.3.2 钣金件的绘制	13
2.3.3 伺服电机支架的建模	17
2.4 机器人的机构与装配	23
2.4.1 使用通用零件	23
2.4.2 使用标准件	24
2.4.3 三维空间中的装配	25
2.4.4 装配模型的动作检查	27

第 3 章	MSC.visualNastran 4D	33
3.1	MSC.visualNastran 4D简介	34
3.2	CAD形状的取出——与Inventor的协同	35
3.3	机构分析	36
3.4	建立机构分析模型	37
3.5	仿真设置	40
3.6	进行机构分析	40
3.7	结果的计测器测量功能	41
3.8	简单机构分析实例	41
3.9	结构分析	46
3.10	结构分析的设置	47
3.11	简单结构分析实例	49
3.12	4D分析	53
3.13	简单4D分析实例	54
第 4 章	基于MATLAB/Simulink的控制模块	59
4.1	MATLAB/Simulink简介	60
4.1.1	MATLAB产品家族的组成	65
4.1.2	MATLAB的使用	66
4.1.3	使用Simulink	71
4.1.4	Stateflow的使用	73
4.2	控制器的设计	79
4.2.1	控制对象	79
4.2.2	最优调节器设计	83
4.2.3	卡尔曼滤波器的设计	84
4.2.4	LQG调节器的组成	86
4.3	仿 真	87
4.3.1	LQG调节器的仿真	87
4.3.2	摆动控制仿真	87
4.4	参数调整	89
4.4.1	控制对象	90
4.4.2	利用最优化功能中的PID控制器参数调整	90

4.5	代码自动生成功能	92
4.5.1	基于Real-Time Workshop的代码自动生成功能	92
4.5.2	PID控制器的参数调整	93
第5章	集成应用	95
5.1	ROBO-ONE on PC的软件集成	96
5.2	电机模型的仿真	96
5.2.1	电机模型	96
5.2.2	基于Simulink的电机建模方法	98
5.2.3	基于MSC.visualNastran 4D的仿真	100
5.2.4	MSC.visualNastran 4D环境下电机的仿真	101
5.2.5	Simulink与MSC.visualNastran 4D的协同	107
5.3	电机模型的反馈定位控制	109
5.3.1	仿真的目标	109
5.3.2	PD控制器配置与反馈闭环建立	110
5.3.3	干扰负载作用下的输出角位移	112
5.4	基于旋转角度电机的简单定位控制	113
5.4.1	简单的定位控制方法	113
5.4.2	模型的生成	113
5.4.3	MSC.visualNastran 4D下的反馈定位控制	115
5.5	基于简易人形模型的仿真	116
5.5.1	基于旋转角度电机的人形简易模型	116
5.5.2	控制器的组成	121
5.5.3	基于姿态数据的关节角度的计算	122
5.5.4	计算姿态数据	124
5.5.5	任务管理	129
5.5.6	控制器的表述	130
5.5.7	仿真结果	132
5.6	重力加速度的检测和控制	133
5.6.1	目的	133
5.6.2	传感器的建模方法	134
5.6.3	仿真结果	136
5.7	倒立摆的控制	136
5.7.1	高柔性控制	136

5.7.2	倒立摆的状态空间模型	137
5.7.3	MSC.visualNastran 4D中控制对象模型的表达	139
5.7.4	在Simulink中构建控制系统	141
5.7.5	反馈增益的设置	142
5.7.6	仿真结果	145
5.8	仿真与实际的区别	146
5.9	基于PC串口的伺服电机实时控制	146
5.9.1	Simulink的实时动作	146
5.9.2	与机器人伺服电机的通信	151
5.9.3	机器人步行	156
5.9.4	在Dynamixel中的使用	160
5.9.5	Real-Time Workshop的使用	166
5.10	使用xPC Target的机器人开发	166
5.10.1	xPC Target的开发环境	166
5.10.2	Target PC的安装	168
5.10.3	在主PC中生成Simulink模型	169
5.10.4	Target PC中模型的动作	171
	参考文献	173

第6章 应用案例

6.1	ROBO-ONE on PC	176
6.1.1	ROBO-ONE	176
6.1.2	ROBO-ONE on PC的内容	176
6.1.3	参赛机器人	177
6.1.4	仿真概述	179
6.1.5	实现仿真之梦	180
6.2	U-knight	181
6.2.1	U-knight简介	181
6.2.2	外观	182
6.2.3	设计	184
6.2.4	基于Inventor的设计	185
6.2.5	创建制作图纸	191
6.2.6	制作	191
6.2.7	三维CAD的优点	192

6.3 刚王丸	192
6.3.1 目 标	192
6.3.2 刚王丸模型	193
6.3.3 刚王丸的控制	194
6.3.4 刚王丸存在的问题	198
6.3.5 刚王丸的改进	200
6.4 FZ-2	201
6.4.1 模型的准备	201
6.4.2 MSC.visualNastran 4D的设置	201
6.4.3 程序框架	202
6.4.4 编程步骤	203
6.4.5 仿真结果与反思	206
6.5 开拓者4号	207
6.5.1 仿真环境	207
6.5.2 开拓者4号的配置	207
6.5.3 机器人的设计	208
6.5.4 机器人的机械模型	208
6.5.5 机器人的控制程序	209
6.5.6 实施仿真	211
6.5.7 今后的目标	214
6.6 bode	215
6.6.1 在ROBO-ONE on PC出场	215
6.6.2 Mission2的结果概述	215
6.6.3 Mission2技巧——向前跳的方法	215
6.6.4 Mission2技巧——缓缓着地的方法	220
6.6.5 伺服电机模型是成功的关键	222

第 1 章

基于模型的集成开发

西村 辉一 ROBO-ONE委员会代表。

1.1 什么是集成开发

在机器人制作中，把从CAD开始到结构分析、机构分析及控制的全过程集成起来，可以高效地进行机器人开发。“集成”的意思就是在这些开发过程中使用不同软件，使每一个过程各有所长。CAD是用于实现CAD设计的软件，其使用性能优良并适用于不同专业领域，同时也是用于机构分析、结构分析最好的软件。这里，从上游到下游的设计数据必须集成起来使用。所以，把不同厂家的软件集成起来使用就叫做集成开发（图1.1）。

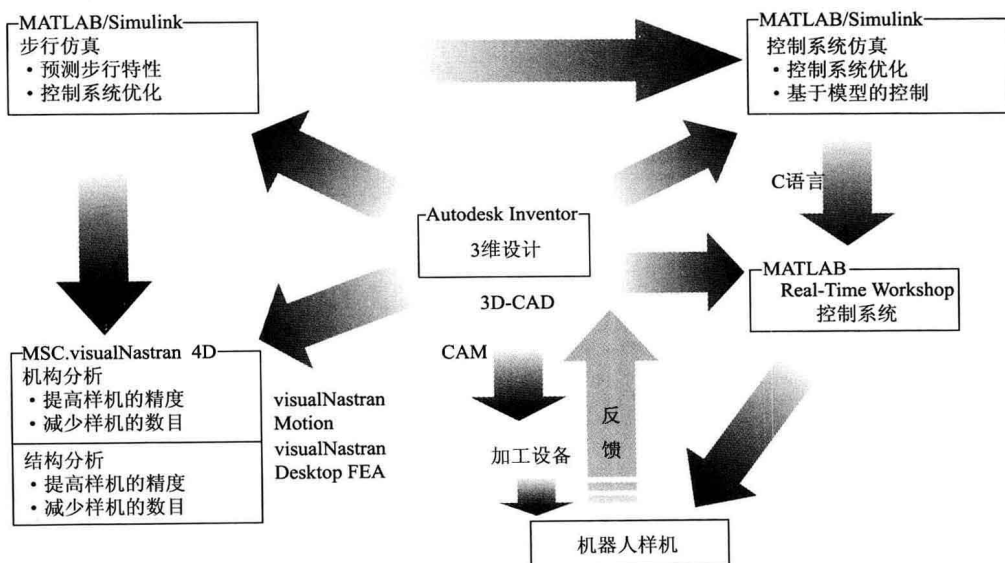


图1.1 集成开发实例

这里，CAD采用的是Autodesk Inventor软件，结构与机构分析采用的是MSC.visualNastran 4D软件，而控制采用的是MATLAB/Simulink软件环境。将这几种不同的软件协同起来使用不仅能提高开发效率，而且不用重复创建模型。同时，也会大幅度减少资源浪费。

1.2 机器人开发的流程

业余爱好者在进行机器人开发时，可以按下面的步骤进行：

- (1) 机器人整体结构设计；
- (2) 画图纸；
- (3) 制作零部件；

- (4) 组装机器人；
- (5) 编写步行动作程序。

如果由于结构与强度的问题而导致机器人动不起来，就只能返回（1）重新开始。很多人便会认为双足机器人太难而放弃，也有一些人在花费了很多工夫之后还是无法使机器人动起来。

双足步行机器人中常常使用多个伺服电机，因此连接这些伺服电机的元器件会比一般机器人中的零件数目多出很多，要在软件中解决这些问题是非常令人头痛的事情。如果只是轻量化制作的话，软件开发就会变得轻松些。可是，要让机器人动起来，就必须确定各部分的强度和伺服电机的转矩。而现在，我们不需要再制作出真实模型后编程演示，运用基于模型的集成开发就可以了。

基于模型的集成开发流程如下：

- (1) 设计机器人的草图；
- (2) 画设计图；
- (3) 导入机构分析软件；
- (4) 编写软件；
- (5) 编制步行程序；
- (6) 进行机构分析，求出所需力矩；
- (7) 进行结构分析；
- (8) 提高强度或轻量化。

重复以上过程，提高完成度。至此，就是所谓的虚拟开发。

- (9) 制作零部件；
- (10) 装配；
- (11) 将写好的程序，下载代码到CPU中，机器人就会动起来。

根据以上流程，我们可以结合自己所预期的机器人动作情况计算伺服电机的转矩、结构体的强度以及所需CPU的能力等。这样，可以大大降低元器件购置时的选型错误或无谓的重复试制带来的损失。并且，编写程序的语言也较容易理解，有助于机器人进一步智能化。



1.3 CAD

现在，CAD已经被普遍使用，特别是随着三维建模的进一步普及，其三维设计图中也增加了所包含的多种数据信息。所以，如果知道材料，我们可以求出从形状到质量、重心位置等各种各样的物理量。并且，在装配状态下可以进行干涉检查或动作检查。把这些三维数据传送到机构分析软件或结构分析软件中，再把这些过程串起来，在PC上进

行反复分析、修正，就能使设计过程大大缩短。图1.2是Inventor的例子。

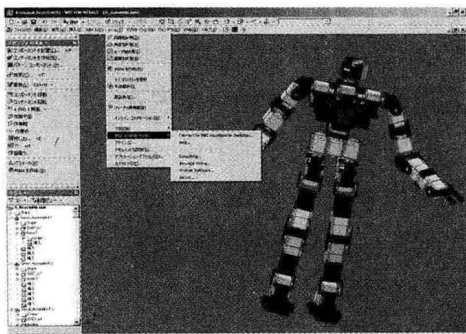
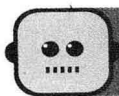


图1.2 Inventor 举例



1.4 CAE

CAE (Computer Aided Engineering) 就是通过PC进行开发，尤其是在结构分析领域，宏观一点地说就是虚拟开发，即在PC上进行制作。本书中将采用MSC.visualNastran 4D进行结构分析和机构分析。

1.4.1 结构分析

计算零部件的强度或振动时常采用有限元法。有限元法就是把复杂零部件的形状分割成许多小单元，再把这些单元组合起来计算整体的应力和应变。这种方法可以实现高强度设计和轻量化。图1.3是结构分析的实例。

1.4.2 机构分析

在机构分析中，可以对连杆机构等运动学模型进行分析，还可以使机器人在PC上动作。在每个关节处安装伺服电机，根据输入的数据进行动作（图1.4）。这里，伺服电机与编程语言Simulink连接，通过Simulink 给定各个关节的角度，机器人就可以在PC上显示给定运动。

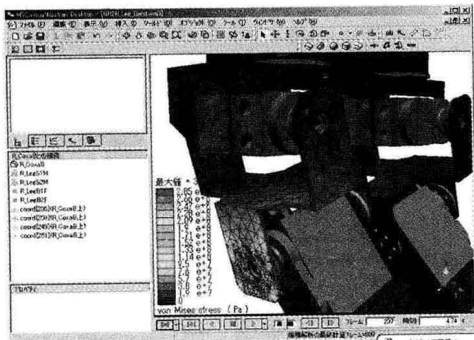


图1.3 结构分析举例

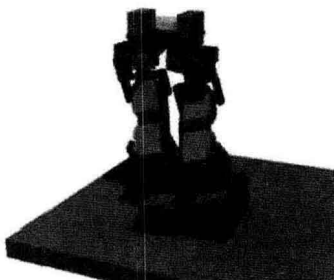
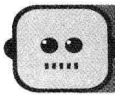


图1.4 机构分析举例



1.5 Simulink

1.5.1 MBD

最近，各个企业都开始在推广基于模型的开发（Model Base Development）。在这些工作中以基于使用Simulink的程序开发，对开发的全过程通过Simulink进行建模。把这些有效的手段集成到一起，通过虚拟制作，就会缩短开发周期、降低开发成本。

1.5.2 Simulink简介

Simulink是组装模块、编写程序的一个工具。如图1.5所示，使用配置的虚拟示波器可像真实示波器那样显示计算结果。用Fortran、C语言编写，更便于理解，可以简洁地表示计算过程。并且，如图所示的程序格式简单易懂。

1.5.3 与MSC.visualNastran 4D的协同

一般在开发控制程序时，要把控制对象模型化，进而评价其程序的合理性。可是，对控制对象建模是一项非常麻烦的事情。在力学建模时，可以通过Inventor把设计的模型导入MSC.visualNastran 4D中，并将这个模型作为控制对象。图1.6是把MSC.visualNastran 4D连接到Simulink中添加的S-Function程序。这个函数可以输出需要的控制信息，输入用于控制的数据，以此验证控制的正确性。

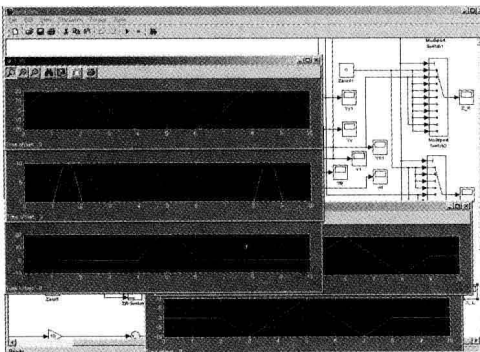


图1.5 Simulink 画面

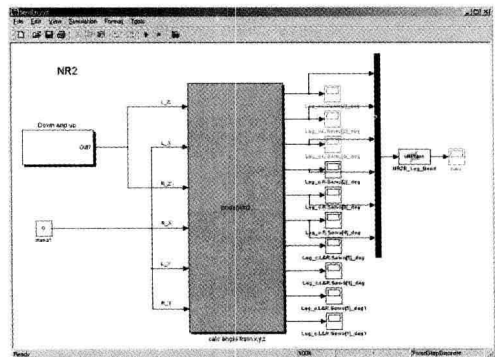


图1.6 与MSC.visualNastran 4D的协同

1.5.4 实时工作间嵌入式代码

在Simulink中开发的程序可以通过实时工作间下载到C语言中。只要将输入/输出设定成与所使用的微处理器相对应，就可以使机器人按预定动作运动。并且，在实时工作间嵌入式代码（Real-Time Workshop Embedded Coder）中，会生成与CPU对应的代码。图1.7是Power PC的开发环境。

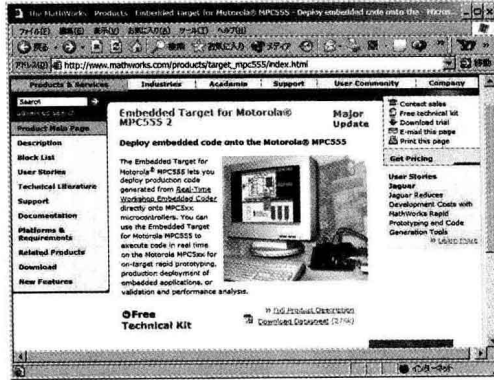


图1.7 MPC555的开发环境

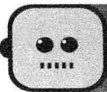
上面简单介绍了集成MBD。从下一章开始，进一步详细介绍。



第2章

三维CAD系统

宇土 和宏 生于1971年，毕业于长崎大学工学院机械系统工学系，现在在Autodesk公司从事以Autodesk Inventor Series为中心面向制造业的软件服务的营销技巧和市场营销工作。



2.1 三维CAD简介

这里就三维CAD进行简单介绍。自1970年三维CAD的三维线框（Wireframe）模型开始投入市场以来，人们逐步开发了面模型和实体模型，但是与此相关的用于分析、制造方面的通用三维CAD系统却由不同的CAD制造厂家提供。

截至目前，三维CAD的目的除了表示二维CAD不能定义的三维模型空间内的形状外，还可以用于生成更精确的数据（如NC代码等）和分析模型，使CAD数据得到更有效、灵活的运用。因此，随着面模型开发的深入，曲面定义也从Coons方法向Bezier、NURBS方法发展。可是，这些三维CAD系统只能在比较昂贵的PC或微处理器上运行，操作起来也很麻烦。而且，为了更有效地使用，用户还需要具备一定的数学知识，因此，只有在企业的开发部门或生产技术部门使用此系统。

其中需要特别注意的是实体模型。由于在构建面模型中要重复进行粘贴操作，因此需要考虑修补和操作顺序，在进行复杂形状建模时，就需要非常娴熟的技巧和足够的时间。可是，在实体模型中，利用形状集合运算，像搭积木那样构建模型，可以更加直观地进行建模。这里，进行复杂的数据处理时数据结构需要大量的PC资源（CPU性能、内存、磁盘大小等）。为此，实体模型的普及就指望20世纪80年代中期出现的高性能工作站。

与此同时，实体模型的应用技术也得到了发展。实体模型表达方法开始从CSG向它的主流B-REPS方向发展，进而与面模型融合形成混合模型。所以出现了通过体素的交并差运算生成实体模型的方法，并且可以生成具有自由曲面的实体模型。同时，也出现了通过自由曲面切取实体模型的雕刻建模法。

第一代三维CAD系统进行建模时需要精确地输入尺寸，但是，在需要变更其形状时，要先消除需变更的部分后再重新建模。为了进一步普及三维CAD，必须解决这个问题。我们把这样的开发称为参数连接（Parameter Link）方法。

1990年初进入市场的三维CAD系统是把实体模型的构建历程作为数据，通过编辑历程，可以自动改变形状的模式框架。同时产生了Feature（特征）的概念。Feature表示形状的特征，如凸缘、孔、端面、倒角（圆角）等实体模型的各个部位的特征。也就是说，特征是构建实体模型的最小单位。

最近，主流计算使用的硬件是PC和 workstation。随着硬件的进一步高性能、低成本化，Parameter Link模型已经得到了普及，从而成为第二代三维CAD系统。

1990年下半年，出现了在PC上运行的中端三维CAD系统。而PC上运行的面模型和实体模型等均为高端三维CAD系统。又因为其低价格供应市场，加速了三维CAD系统的普及，使得三维CAD成为产品设计过程中必不可少的工具。

本章中采用中端三维CAD系统中的Autodesk Inventor软件来进行以实际操作为主的学习，从而加深对三维CAD系统的理解。

2.2 Inventor 的使用

下面介绍Inventor的基本操作过程（图2.1）。先以三维CAD中一般形状的基本图形作为截面形状进行绘制。然后，通过附加称之为Feature的形状特征，构建实体形状。

在进入下一节的设计阶段之前，需要先打开Inventor软件中附带的图2.2所示Inventor教程。

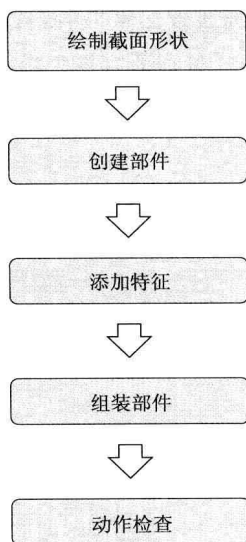


图2.1 Inventor的基本操作过程

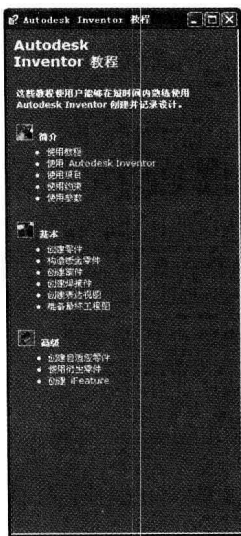


图2.2 Inventor教程

2.3 机器人部件设计

在这一节中，我们学习设计机器人部件的操作步骤。在三维CAD中构建一般部件形状的过程叫做几何建模。下面就进行机器人三维CAD形状的绘制。

2.3.1 绘图

下面开始模型制作。在建模时，需在绘图平面中定义截面形状。建模之前，我们先稍稍做一下绘图练习。

准备阶段，需要进行以下操作。首先，打开新建文件夹，在“文件”菜单的“新建文件”下，打开“Standard.ipt”。接着，确认网格所表示的部分（输入绘图模式，准备完成）。