

Getting started

刚柔耦合动力学仿真

UM 软件入门系列教程

(04)

四川同算科技有限公司 译

2021年3月

前言

本教程介绍使用UM FEM模块进行刚柔耦合系统动力学建模和仿真基本方 法和流程。其中,柔性体模型在有限元软件里建立并导入UM软件,其弹性变形 只能为小变形,且是线性的。

本教程将通过两个例子讲解多刚体系统与柔性体耦合的实现过程。有关柔性体建模和计算更加详细的内容,请参见用户手册第11章。

请读者在学习本课程之前务必先学习《UM软件入门系列教程01:多体系统 动力学仿真》,并熟悉UM软件的基本操作:新建模型,创建几何图形、刚体、 较和力元。

UM FEM模块应用修正的Craig-Bampton模态综合法来实现柔性体的动力 计算,这种方法需要求解柔性体的一组固有模态和静模态。UM FEM模块提供 了ANSYS、ABAQUS、MSC.NASTRAN和NX NASTRAN等有限元软件的接口 程序。

本教程以ANSYS为例进行讲解,其余软件接口的用法请参见第11章用户手册。

在UM模型里,每个柔性体作为一个单独的子系统存在,最终的数据文件为 input.fss。使用ANSYS软件时有两种方式得到input.fss文件。其一是直接通过程 序ANSYS_UM.EXE转换得到;其二是先用ANSYS_UM.EXE转换得到input.fum 文件,再到UM Input程序里用柔性子系统向导转换生成input.fss文件。

一旦生成了**input.fum**或**input.fss**文件,那么就不再需要**ANSYS_UM.EXE** 和**ANSYS**了,后续操作全部在**UM**软件里进行。

请读者务必逐页阅读、一步一步操作,有些基本的软件操作在后面不会详细 介绍甚至忽略。

请先运行UM Input或UM Simulation程序,选择菜单Help | About,在弹出窗口查看UM FEM一栏是否为 "+"标记,若显示为 "-",则请重新申请试用或购买正版许可。

版权和商标

本教程仅供读者参考,不同的版本其界面可能有个别不同之处,我们会不定 期进行修订。对于本文档中可能出现的任何错误,我们不承担任何责任或义务。

版权所有© 2021 Computational Mechanics Ltd.

俄罗斯计算力学有限公司保留所有权利。

联系方式

最新版的UM软件和相应的用户手册下载地址:

<u>http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=3</u>. 若无法访问,请点击: <u>http://www.umlab.ru/en/pages/index.php?id=3</u>. 在使用过程中,读者如有任何报错、疑问和建议,请发送邮件至:

um@universalmechanism.com

UM总部

Computational Mechanics Ltd.

Vostochnaya str. 2-14, Glinischevo, Bryansk region, 241525, Russia

Phone, fax: +7 4832 568637

www.universalmechanism.com www.umlab.ru

UM中国

四川同算科技有限公司

四川省眉山市彭山区蔡山西路2号伟业广场1911室

办公电话: 028-38520556

公司网站: <u>www.tongsuan.cn</u>

电子邮件: <u>um@tongsuan.cn</u>





微信公众号

QQ 交流群

1.	曲柄->	骨块机构	1
1.1	配置	E ANSYS 工作环境	3
1.2	准备	▶连杆柔性体模型	4
	1.2.1	在 ANSYS 里的工作	4
	1.2.2	柔性子系统向导	6
1.3	刚才	等耦合系统动力学建模	13
	1.3.1	创建几何图形	14
	1.3.2	创建刚体	16
	1.3.3	创建柔性子系统	17
	1.3.4	创建铰	18
1.4	刚才	关耦合系统动力学仿真	21
2.	柔性平	2台-电机模型	27
2.1	准备	▶柔性平台	28
	2.1.1	在 ANSYS 环境里工作	29
	2.1.2	在 ANSYS Workbench 环境里工作	30
	2.1.3	柔性子系统向导	37
2.2	刚才	等耦合系统动力学建模与仿真	38
	2.2.1	导入柔性平台	38
	2.2.2	连接柔性平台与大地	39
	2.2.3	创建几何图形	39
	2.2.4	创建力元	43
	2.2.5	导入电机子系统	46
	2.2.6	设置电机转子速度曲线	48
	2.2.7	连接电机与柔性平台	50
	2.2.8	计算系统平衡位置和固有频率	52
	2.2.9	运动仿真	54

目 录





1. 曲柄-滑块机构

本例模型为一个曲柄-滑块机构,如图 1.1 所示。在{**UM Data**}**SAMPLES**\ **Flex** 目录有一个名为 **slider_crank_all** 的模型。这个模型里共有三个曲柄-滑块机 构,其不同之处在于构件连杆的建模方式:

- 连杆为一个刚体;
- 连杆为一个子系统,由11个刚体通过铰和力元连接而成;
- 连杆为一个柔性体,从有限元软件导入。



图 1.1 曲柄-滑块机构: 1-机架, 2-曲柄, 3-连杆, 4-滑块 这里主要介绍第三个模型——刚柔耦合机构的建模流程:

- 1. 建立连杆的有限元模型;
- 2. 计算所需的模态,并转换保存为 UM 格式;
- 3. 创建几何图形;
- 4. 创建刚体 (曲柄和滑块);
- 5. 导入连杆弹性体;
- 6. 创建铰和力元。

前两步在 ANSYS 里进行,后面四步在 UM 软件里进行。

备注: UM 使用子系统技术处理外部导入的柔性体,每个柔性体都是一个独立的 子系统,导入时选择 Linear FEM Subsystem 类型。

我们可以先创建一个工作目录,方便后续模型使用,如: {UM Data}\My Models,或者 D:\models。

以下以"小"来表示工作目录。在这个目录下我们再创建两个子文件夹:

- flexbeam: 存放柔性体数据;
- slider_crank_fem:存放刚柔耦合模型。





根据自身情况,读者可以有选择地阅读本教程。

- 如果有 ANSYS 软件,并想学习从 ANSYS 导入 UM 的整个流程,那么 请逐页顺序阅读。
- 如果没有 ANSYS 软件或者不想学习在 ANSYS 里的准备工作,那么请 直接从 1.2.2 章节开始阅读。请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\ flexbeam 目录复制 input.fum 文件到.\flexbeam 目录。
- 如果想跳过所有准备柔性体文件的步骤,可以直接从 1.3 章节开始阅读。
 请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam 目录复制 input.fss 文件到.\flexbeam 目录。

Universal Mechanism 9





1.1 配置 ANSYS 工作环境

我们需要先使用 ANSYS 软件创建柔性体模型,然后运行宏命令 um.mac 计算静模态和固有模态,再通过 ANSYS_UM.EXE 转换为 UM 的数据格式。

宏命令文件 um.mac 位于 UM 安装路径的 bin 文件夹下,需要将其复制到 ANSYS 的 apdl 目录。否则,请通过 ANSYS 命令来自定义宏文件搜索路径:

/PSEARCH,Path_to_macro

转换程序 ANSYS_UM.EXE 也位于 UM 安装路径的 bin 文件夹下,为了在 um.mac 执行完毕后自动运行程序 ANSYS_UM.EXE,我们需要打开 um.mac 文 件指定 ANSYS_UM.EXE 的完整路径,如:

/sys,c:\um\bin\ansys_um.exe

备注:如果 ANSYS_UM.EXE 的路径中包含空格,那么需要用双引号,如: /sys," C:\Program Files\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\bin\ansys um.exe"

ANSYS_UM.EXE 的路径只能包含英文字母和数字,不支持中文。





1.2 准备连杆柔性体模型

如前所述,对于刚柔耦合系统中的柔性体,需要先在有限元软件里计算其模态矩阵,一般有两种方法:

- 集中质量矩阵;
- 一致质量矩阵。

在{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input 目录下有两个文件夹:lumped 和 consistent,其中分别对应使用集中质量矩阵和一致质量矩阵计算连杆模态的 ANSYS 命令流文件。

本例我们采用集中质量矩阵。

1.2.1 在 ANSYS 里的工作

- 首先,请从{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input\lumped 目录复制 flexbeam&mass21.ans 文件到先前创建好的.\flexbeam 目录。该文件为 ANSYS 命令流文件,用 APDL 语言编写,可自动完成建模。
- 2. 运行 ANSYS 程序(经典界面),指定、flexbeam 目录为当前工作目录。
- 3. 选择菜单 File | Read Input from,选择 flexbeam&mass21.ans 文件, ANSYS 开始自动建模和计算。模型为一根长 2m、截面为 2cm*2cm 的 钢梁,共有 100 个 BEAM4 梁单元和 200 个 MASS21 质量单元。梁两端 的节点选为界面节点。如果 um.mac 文件已经复制到 ANSYS 的 APDL 目录,那么它会自动运行计算出 12 阶静模态和 10 阶固有模态。
- 如果 um.mac 文件中的 ANSYS_UM.EXE 路径定义正确,那么在 um.mac 执行完毕后,ANSYS_UM.EXE 会自动运行,弹出如图 1.2 所示的界面。
 否则,请手动运行,其文件路径为{UM}\bin\ansys_um.exe。

File	Options	Sensors	
ANSY:	6 results file	(*.rst):	
D:\Mo	dels\flexbe	am\flexbeam.rst	
☑ Sav Target	ve to the sa directory:	me directory	
D:\Mo	dels\flexbe	am\flexbeam	È
_			
C	eate	Close	

图 1.2 ANSYS_UM 程序界面





5. 在File页面,点击按钮,选择上一步计算得到的ANSYS结果文件,路

径为.\flexbeam\flexbeam.rst, 勾选Save to the same directory, 自动将保 存目录设置为.\flexbeam\flexbeam(第一个flexbeam是我们先前创建的文 件夹, 第二个flexbeam是程序自动识别的有限元模型名称)。

 在Options页面,取消勾选normalize modes,这样我们就不直接生成最 终的input.fss文件,而是生成中间格式文件input.fum。下一步我们再用 UM的柔性子系统向导工具进行转换得到最终所需的文件input.fss。

i Cre	ating da	ta set for si	mulation	of flexible be	bdy		(
File		Sensors						_
Irans	formations							
	ormalize mi							
IN EX	kolude rigid	l body modes						
Fr	equency:	0.500	2					
_								
Cri	eate	Close						

备注:其实这里也可以勾选 normalize modes,直接得到 input.fss 文件,注意需要 在 Exclude rigid body modes 处设置一个频率,以将 6 个刚体模态剔除。

- 7. 点击Create按钮,生成input.fum文件并存放于.\flexbeam\flexbeam目录。
- 8. 点击Close,关闭ANSYS_UM.EXE程序。





1.2.2 柔性子系统向导

由 ANSYS UM.EXE 程序得到的中间格式文件 input.fum 包含了 ANSYS 软 件计算得到的静模态和固有模态,我们需要进行正交变换。UM 软件的柔性子系 统向导是一个可视化的模态转换工具,可以将 input.fum 转化为 input.fss。

- 1. 运行 UM Input 程序。
- 2. 选择菜单 Tools | Wizard of flexible subsystem, 弹出柔性子系统向导窗 口。
- 3. 点击按钮,选择.\flexbeam\flexbeam 文件夹里的文件 input.fum,点

击 OK,如图 1	.4 所示。		X
@ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \		Select d Data file	ata file
	Read FEM model of object Scan the forder: D:\Models\flexbeam\flexbeam		a l
	▲ - ② D: \Models\flexbeam	Data imported from program: ANSYS1 Name of solution: flexbeam 01.03.2021, 10:35:45, Flexible beam ' Nodes: 101 Finite elements: 300 Degrees of freedom: 606 Normal modes: 10 Static modes: 12 Computation with lumped mass matrix Min. natural frequency: 355.87 Generalized mass matrix: present Generalized stiffness matrix: present	
	D: Wodels \flexbeam \flexbeam \input.fum		
	图 1.4		





柔性子系统向导加载弹性体模型并在 General 页面显示其主要信息,如图 1.5 所示。Position 页面可以调整弹性体在动画窗口显示的位置和方向,当前梁 模型与 X 轴重合,不便于观察,我们可以将其移动适当距离。

Models (flexbeam) flexbe	a am linnut fum
The states and the second second	
ubsystems information	
ile of subsystem: :\Models\flexbeam\flexb	eam\input.fum
ata imported from progra	am:
NSYS18.0	
lame of solution:	
iexpeam itle of solution (comment)).
01.03.2021,10:35:45, Fle mass21 elements for defi moment	exible beam with nition torsion inertia
lodes:	10
inite elements:	30
egrees of freedom:	60
lormal modes:	1
tatic modes:	1

图 1.5

4. 点击 Position 页面。

5. 设置 Shift | z 为 0.3, 如图 1.6 所示。





Gen	eral Position Image Solution	
Shi	ft	
х	<u>n</u>	
у	<u>n</u>	
z	0.3 <u>n</u>	
Ro	tation	
	▼ 0.00000000	
	• 0.00000000	
	• 0.00000000	× ×
Shi	ft after rotation	
x	<u>n</u>	
у	<u> n</u>	
z	<u>n</u>	

图 1.6

在 Image 页面可以设置弹性体的显示模式: Simplified 和 Full。Full 模式需要占用更多的 CPU 和内存资源,当光标指向单元或节点时,会显示相关信息。

- 6. 设置 Image 为 Full 模式。
- 7. 取消选择 Image parameters 框的 Draw nodes 选项, 勾选 Hide elements 框的 Single node elements 选项, 如图 1.7 所示。







Solution 页面可以查看弹性体每一阶模态的频率和振型动画。选中某阶模态, 点击 Animate 即可。可通过 Amplitude 和 Rate 调节显示的振动幅度和快慢。

每一阶模态前面有一个复选框,默认为勾选状态,可以根据研究需要取消选 择某些模态。需注意,模态越多计算越精确,但计算量越大。对于具体模型,需 要在精度和效率之间找到一个折中方案。

因此,通常只需要在ANSYS里计算一次模态(取研究所需最大的模态阶数), 然后在 UM 的柔性体子系统向导可选择不同数量的模态分别进行转换,做对比 研究。





- 8. 勾选 Save to the same directory, 勾选 Transformations | Exclude rigid body modes, 设置 Frequency 为 0.3 (Hz), 如图 1.8 所示。
- 9. 点击 Transform 按钮,开始转换。

	General Position Image Solution
-	Data set
	Original
	Transformed
	Name of transformed solution
	flexbeam
	Save to the same directory
	Modes Rigid body Interface nodes
	10 normal modes, 12 static modes
	Selected normal modes: 10
	Selected static modes: 12
	✓ 1. normal, 26.668
	☑ 2. normal, 26.668
	3. normal, 73.512
	V 4. hormal, 73.512
	6. normal, 144.112
	7. normal, 238.224
	▼ 8. normal, 238.224
	☑ 10. normal, 355.866
	☑ 11. static
	✓ 12. static
	🔽 13. static 👻
	Animation of modes
	Amplitude Rate
	Frame per 1/4 period: 5 1/1
	Animate
	Transformations
	Modes Shift SC Rotation of SC
	Exclude rigid body modes
	Frequency: 0.3
	Exclude rotational DOFs in modes
	Exclude if all DOFs are zero
	Transform Save as

图 1.8





10. 然后依次点击是(Y),确定,OK。



备注:有限元计算得到的模态包含了其刚体模态,根据 C-B 模态综合法原理, 必须将其剔除。理论上刚体模态频率为 0Hz,但由于数值方法和舍入误差,计算 得到的刚体模态频率不一定为 0,可能是接近 0 的数。

实际上在 Transformations | Frequency 设置的截断频率,即表示小于该频率值的 模态被认为是刚体模态,并予以剔除。





11. 在 Data set 框可以查看原始模态 (Original) 和转换后的模态 (Transformed),确保选择 Transformed,如图 1.12 所示。





12. 点击 Save as 按钮, 在弹出的对话框设置保存路径, 并点 Save, 如图 1.13 所示。请注意文件夹 flexbeam 将作为一个弹性体子系统。

	Transfo	rmations		
/	Modes	Shift SC	Rotation of SC	
Save flexible subsyst	em data		× es	
Path to subsystem data			2	
D:\Models\flexbeam\fle	xbeam\		<u>i</u>	
	Save	Cano	e	
		<u> </u>	in modes	
	Excl	ude if all D	OFs are zero	
	Tra	osform	Save as	
	1	istoriii		

图 1.13

至此,弹性体模型已经准备好。





1.3 刚柔耦合系统动力学建模

曲柄-滑块机构刚柔耦合模型由两个刚体、一个弹性体和四个铰组成。

刚体:

- 曲柄,长1m;
- 连杆,长2m;
- 滑块。

其中曲柄和滑块为刚体,连杆为弹性体。

铰:

- 曲柄与机架(大地)之间的转动铰;
- 连杆与曲柄之间的转动铰;
- 滑块与连杆之间的转动铰;
- 滑块与大地之间的平动铰。





1.3.1 创建几何图形

- 1. 运行 UM Input 程序,选择菜单 File | New object,新建一个模型。
- 选择菜单 Edit | Read from file,导入几何模型{UM Data}\graph\ Base1.umi,这样就一个名为 NoName 的几何图形就添加到 Images。若 有报错界面出现,点击 No 即可。



 以同样的方法从{UM Data}\graph 导入 Crank1.umi 和 Slider1.umi, 分 别重命名为 Crank 和 Slider。



图 1.16





5. 先左侧模型树选中 Object, 然后在右侧交互界面设置几何图形 Base0 为 Scene Image。

Path C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Uni Object identifier UMObject Comments Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Path C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Uni Object identifier UMObject Comments Generation of equations Symbolic Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: cc ey: cc ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Tr	ansform into subs	vstem
Object identifier UMObject Comments Generation of equations Symbolic Image: Symbolic <	Object identifier UMObject Comments Generation of equations Symbolic Image: Symbolic Gravity force direction ex: ey: c: ey: c: c: c: c: c: c: c: ey: c: o: v: c: c: c: i: i: <td< td=""><td>Path C:\Users\</td><td>Public/Documents</td><td>VIM Software Laby</td></td<>	Path C:\Users\	Public/Documents	VIM Software Laby
Conject identifier UMObject Comments Generation of equations Image: Symbolic Image: Symbolic	Object Identifier UMObject Comments Generation of equations Image: Symbolic Image: Symbolic Image: Symbolic Image: Symbolic Image: Symbolic Image: State	-Object identifier	, asia pocumenta	prin bon cinan e cab (e
Comments Ceneration of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Comments Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c ey: c c c c c c c c c c c c c	UMObject		
Comments Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Comments Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c ey: c c c c c c c c c c c c c c c c c c c	UNODJECC		
Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c ey: c ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c ey: c c c c c c c c c c c c c c c c c c c	Comments		
Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Generation of equations Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: cc ey: cc			
Symbolic Symbolic Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c: ey: c: v: No Base0 Crank Slider	Symbolic Image: Symbolic Ima	Generation of e	quations	
Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: ey: c: v: No Base0 Crank Slider	Numeric-iterative Gravity force direction ex: ey: c: ey: c: v:	Symbolic		
Gravity force direction ex: ex: ey: ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Scene image: No Base0 Crank Slider	Gravity force direction ex: ey: c ey: ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: No Base0 Crank Slider	Numeric-iter	ative	
ex: C ey: C ey: C ez: -1 C Characteristic size: 1.00 C Scene image: No No Base0 Crank Slider	ex: C ey: C ez: -1 C Characteristic size: 1.00 X Scene image: No No Base0 Crank Slider	Gravity force di	rection	
ey: C ez: -1 C Characteristic size: 1.00 A Scene image: No No Base0 Crank Slider	ey: C ez: -1 C Characteristic size: 1.00 C Scene image: No No Base0 Crank Slider	ex:		C
ez: -1 C Characteristic size: 1.00 X Scene image: No No Base0 Crank Slider	ez: -1 Characteristic size: 1.00 Characteristic size: 1.00 Scene image: No Base0 Crank Slider	ev:		C
Characteristic size: 1.00 1	Characteristic size: 1.00			IC.
Characteristic size: 1.00	Characteristic size: 1.00 Scene image: No ▼ No Base0 Crank Slider	ez; -1		
Scene image: No No Base0 Crank Slider	Scene image: No No Base0 Crank Slider	Characteristic size	e: 1.00	Z
No Base0 Crank Slider	No Base0 Crank Slider	Scene image:	No	-
Base0 Crank Slider	Base0 Crank Slider		No	
Slider	Slider		Base0 Crank	
			Slider	
图 117				
图 1.17				
图 1.17				
图 1.17				





1.3.2 创建刚体

- 先左侧模型树选中 Bodies,然后在右侧交互界面点击按钮 ➡,添加一 个刚体。
- 2. 重命名为 Crank,并选择几何图形 Crank。
- 3. 在 Parameters 页面,勾选 Compute automatically,程序自动根据几何 形状的密度计算出质量和转动惯量,如图 1.18 所示。

Orient	ed points	Vec	tors	3D Cont	act
Para	meters	Pos	ition	Point	s
Coordinat	es (PP):	Quaternion			•
Go to elerr	nent				ø
Image:		Visib	le		
Crank					-
Comput	te automat	tically			
Inertia pa	rameters				
Mass:	7.403				C
Inertia te	nsor:				
0.004713	0039 🖸		C		C
		1.33271	C		C
				1.3353432	C
Added ma	ass matrix:		[(none)	
Coordinat	tes of cent	er of mass			
0.5	C	5.578E-20	C	2.841E-19	C

图 1.18

4. 用同样的方法创建刚体 Slider。





1.3.3 创建柔性子系统

- 先在左侧模型树选中 Subsystems,然后在右侧交互界面点击按钮 +, 添加一个子系统。
- 2. 从 Type 下拉菜单选择 Linear FEM Subsystem,并在弹出对话框选择 flexbeam,点击 OK。
- 重命名为 Con-rod FEM。
 这样就导入了弹性体模型,其界面与柔性子系统很相似,但有两处不同:
 - 这里不能选择或取消某些模态;
 - 这里 Position 界面设置的参数会影响到弹性体在整个模型中的位置。

Detwoodels \flexbeam Data imported from program: ANSYS1 Name of solution: flexbeam 0.03.2021, 10:35:45, Flexible beam Nodes: 101 Finite elements: 300 Degrees of freedom: 606 Normal modes: 16 Static modes: 0 Computation with consistent mass ma Min. natural frequency: 26.66 Max. natural frequency: 21717.63 Generalized mass matrix: No D:\Models\flexbeam OK Cancel Image: Con-rod FEM Type: Linear FEM subsystem Comments/Text attribute C	Image: Solution of the set of the s	- 🕞 D		
D: Wodels\flexbeam\flexbeam OK Cancel III + III + Name: Con-rod FEM + • Type: Inear FEM subsystem Comments/Text attribute C	D: Models \flexbeam \flexbeam OK Cancel		: \Models\flexbeam ∰ flexbeam	Data imported from program: ANSYS1 Name of solution: flexbeam 01.03.2021,10:35:45, Flexible beam Nodes: 101 Finite elements: 300 Degrees of freedom: 606 Normal modes: 16 Static modes: 0 Computation with consistent mass ma Min. natural frequency: 26.66 Max. natural frequency: 1717.63 Generalized mass matrix: No
OK Cancel Image: Con-rod FEM Image: Con-rod FEM Name: Con-rod FEM Image: Con-rod FEM Type: Image: Linear FEM subsystem Comments/Text attribute C	Name: Con-rod FEM	D: Wodels	\flexbeam \flexbeam	
Name: Con-rod FEM + •	Name: Con-rod FEM + +	ОК	Cancel	- III
Type: Inear FEM subsystem		Name:	Con-rod FEM	+ +
Comments/Text attribute C	Type: 🗊 Linear FEM subsystem	Type:	🕼 Linear FEM subs	ystem
	Comments/Text attribute C	Comme	nts/Text attribute C	-

图 1.19





1.3.4 创建铰

- 1. 先在左侧模型树选中 Joints, 然后在右侧交互界面点击按钮 , 添加一 个铰。
- 选择 Base0 作为 Body1,选择 Crank 作为 Body2,类型为 Rotational, 转动轴为Y轴,如图 1.20 所示。

Name: jBa	ase0_Crank	+	• 🕩	1 ¬	,
Body 1:		Body2:			
Base0		 Crank 			-
Type: 🧹	Rotational				
Geometry	Description J	oint force			
-Joint point	s			R	
Base0				73	
		C			
Crank				5	
	<u>C</u>	C		-	С
-Joint vecto	ors				
Base0	axis Y	' : (0,1,0)			•
0	<u>n</u> 1	<u>n</u>	0		n
Crank	axis Y	' : (0,1,0)			•
0	<u>n</u> 1	<u>n</u>	0		n
<u> </u>					-1

图 1.20

 点击 Joint force 页面,选择类型 Expression,并输入表达式 torque-cdiss_crank*v,回车,在弹出的窗口输入参数: torque=100, cdiss_crank=10。

Geon	netry Description Joint force	
a•b E	Expression	•
Desc Pasc	cription of force/moment al/C expression: F=F(x,v,t)	
Exar -cst	mple: üff*(x-x0)-cdiss*v+ampl*sin(om*t)	
F=	torque-cdiss crank*v	P

图 1.21





4. 另外三个铰定义如图 1.22 所示。

Body1: Crank	-	Body2: Con-rod EEM flevi	neam 👻	1
Type: 🛃 Rotati				1
Comptry p			*	
loint points	ription Joint fo	rce		
Crank			r,	
1	C	C	C	
flexbeam			 ۲.	
-1	C	C	C	
Joint vectors				
Crank	axis Y : (0,1	,0)	~	
0	n 1	n o	n	
		0		
flexbeam	axis r : (0,1	.,0) IN lo	~ 	
Name: jflexbean	m_Slider			N.
Name: jflexbean Body1:	m_Slider	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	1	
Name: jflexbean Body 1: Con-rod FEM.flext	m_Slider	Body2:)]
Name: jflexbean Body 1: Con-rod FEM.flext	m_Slider	Body2:		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: 〈 Rotatio Geometry Desc	n_Slider	Body2: Slider)
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Kotation Geometry Desco Joint points	n_Slider	Body2: Slider		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Contact Geometry Desc Joint points flexbeam	m_Slider	Body2: Slider) }
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Kotatio Geometry Desc Joint points flexbeam	n_Slider beam [onal ription Joint fo	Body2: Slider		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Control FEM.flext Geometry Desc Joint points flexbeam 1 Slider	n_Slider	Body2: Slider		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Contact Con-rod FEM.flext Type: Contact Geometry Desc Joint points flexbeam 1 Slider	m_Slider beam v liter onal ription Joint fo	C		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Kotatio Geometry Desc Joint points flexbeam 1 Slider	m_Slider beam	C C		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Control FEM.flext Type: Rotation Geometry Desc Joint points flexbeam 1 Slider Joint vectors flexbeam	n_Slider beam ! onal ription Joint fo C axis Y : (0, 1	C C C C C C C C C C C C C C C C C C C		
Name: jflexbean Body1: Con-rod FEM.flext Type: Rotation Geometry Descon Joint points flexbeam 1 Slider Joint vectors flexbeam 0	m_Slider beam			





Slider		Ū ~	
Bod	ly2:		
✓ Slide	er	-	
slational		~	
scription Joint force	:		
		B	
		hz 🛛	
C	C	C	
,		۲ _ک	
C	C	C	K A
axis X : (1,0,0)		~	
<u>n</u> 0	<u>n</u> 0	n	
axis X : (1,0,0)		~	
<u>n</u> 0	<u>n</u> 0	n	
	Boo Slational scription Joint force C axis X : (1,0,0) n axis X : (1,0,0) n 0	Body2: Body2: Slider slational scription Joint force C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	Body2: Body2: Slider \checkmark slational \checkmark scription Joint force C C C C \searrow C C C C \searrow C C C C \square \square \square \square \square \square \square \square

5. 选择菜单 File | Save as 保存模型。

Save as		-×
Path (including obj	je <mark>ct name):</mark>	
D:\Models\slider_(crank_fem	<u>i</u>
	Save	Cancel

图 1.22



6. 最后,请将包含柔性体信息的 input.fss 文件所在文件 夹.flexbeam\flexbeam 复制到模型目录.\slider_crank_fem,这样在运行 仿真时程序会自动找到柔性体子系统,否则需要手动指定。

[具(T) 帮助(H)			
共享 ▼ 刻录 新建文件夹			
名称	修改日期	类型	大小
鷆 flexbeam	2021/3/1 星期—	文件夹	
👔 Con-rod FEM.ini	2021/3/1 星期一	配置设置	3 KB
🔄 input.dat	2021/3/1 星期一	Universal Mecha	5 KB
object.bmp	2021/3/1 星期一	BMP 图像	226 KB

图 1.24





1.4 刚柔耦合系统动力学仿真

- 选择菜单 Object | Simulation,运行 UM Simulation 程序并加载模型(待 UM Simulation 程序运行加载模型后,最好将 UM Input 程序关闭)。
- UM Simulation 程序默认会打开一个动画窗口,如果没打开,可选择菜 单 Tools | Animation window。
- 3. 选择菜单 Analysis | Simulation, 弹出仿真控制界面。读者可以在 FEM subsystems | Image 页面自由设置显示参数。
- 在 FEM Subsystems | Simulation | Option 页面,勾选 Gravity 和 Fix modal coordinates,在 Simulation | Damping 页面,设置阻尼相关系数 a=0.001, b=0,如图 1.25 所示。

Object simulat	ion inspector			Object simulat	tion inspector		
Solver	Identifiers	Initial conditions	Object variables	Solver	Identifiers	Initial conditions	Object variables
XVA	Information	FEM subsyste	ems Tools	XVA	Information	FEM subsyst	tems Tools
Subsystem:	Con-rod FEM			Subsystem:	Con-rod FEM		
General Simul	ation Image Soluti	ion		General Simul	ation Image Soluti	on	
Options Dam	ping			Options Dam	ping		
General				Damping			
Gravity				V Internal di	ssination		
Switch off	all flexible modes			Type of defi	aition		
-Calculation of	finitial conditions			Linear mo	del		
Fix modal of	coordinates			Damping	ratio for each mode		
Storing	es of modal coordinate	29		Linear model	1		
Destination				a: 0.001		<u>n</u> b: 0	n
Memory		File					
File: c:\user	rs\public\documents\u	ım software lab\universal n	nechani: 📶 🐰 🕅	Calculate	o for each mode		
				N Fre	quency (Hz)	Damping re	tio 🔺
				1 26.6	6621	0	
				2 26.6	6621	0	-
				•			۱. ۲
						Set to all	
Integrat	ion	Message	Close	Integra	tion	Message	Close
				. -			

- 图 1.25
- 点击 Initial conditions 页面,从下拉菜单选择 Con-rod FEM 子系统,如 所示。带有业标记的自由度意味着锁定状态。在这里,表示在计算初始 位置时忽略其弹性变形。
- 点击按钮⁴,计算约束状态下的初始位置,这时动画窗口也会相应显示,如图 1.27 所示。





	Inf	ormation	FEM	subsystems		Tools
Sc	olver	Identifiers	Initial cor	nditions	Object variables	XVA
Coordinat	es Cons	traints on initial condition	ons			
e P	a	(+) (-) x=0	v=0 V			
	- <u> </u>					
sider_cra	nk_rem2.0	Lon-rod FEM.				•
	ψ√	Coordinate	Velocity	Commer	nt	
2.1		2	0	Joint (t)	1	
2.2		0	0	Joint (t)	2	
2.3		0	0	Joint (t)	3	
2.4		0	0	Joint (a)) 1	
2.5		0	0	Joint (a)) 3	
2.7	น้ำ	0	0	Mode 1	, 5	
2.8	- The second sec	0	0	Mode 2		
2.9	ψ	0	0	Mode 3		
2.10	ŵ	0	0	Mode 4		
2.11	ŵ	0	0	Mode 5		
2.12	ŵ	0	0	Mode 6		
2.13	ŵ	0	0	Mode 7		
2.14	ψ	0	0	Mode 8		
2.15	ŵ	0	0	Mode 9		
2.16	ψ	0	0	Mode 10	D	
2.17	Ψ	0	0	Mode 1	1	
2.18	Ψ	0	0	Mode 12	2	
2.19	Ψ	0	0	Mode 1	3	
2.20	Ψ	0	0	Mode 14	4 F	
2.21	Ψ .î.	0	0	Mode 1	5	
2.22	Ψ	0	0	Mode 1	5	
•		- Immed				+
Messag	ge dx:	= 0.1 🔟 da=	= 0.1 🔜			
Number of	ra.o.t. =	1/			1	
	Integr	ation	Messa	ige	Cl	ose
				26		
			图 1			
n window	500 <	🕸 🗣 🖦 🖡	1 1 1	D	L @	
n window [Q] 🕀						
n window [Q] 🕀						
n window						
n window Q 🕀						
n window		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~	~~	_	
n window [Q] 🗮					~~	_
n window					\geq	C.
n window [9] �					\geq	
n window		H				
n window		F				
n window						

图 1.27





- 7. 选择菜单 Tools | Graphic window, 打开一个绘图窗口。
- 选择菜单 Tools | Wizard of variables,打开变量向导,创建两个支反力 jCrank_flexbeam 和 jflexbeam_Slider,如图 1.28 所示(Reactions 页面), 并拖入绘图窗口,然后关闭变量向导。

🥩 Variables for grou	up of bodies	S Joint forces	1	Angular variables	🛃 Linear variables	a+b Expressio		
User variables	🕀 Reactions	Coordin	nates	Solver variables	📑 All forces	id Identifier		
🗉 🔳 slider_crank_fem		Selected (total 2)						
jBase0_Crank jCrank_flexbeam jflexbeam_Slider jBase0_Slider Conrod FEM		jCrank_flexbeam,	jflexbeam_	Slider				
		Туре						
		Force		C	Torque			
		Component						
Con-rod FEM	© X	() Y	© Z	I V I	© v			
	Resolved in SC o	fbody						
		Base0	10000					
		Acts on						
		lody 1						
		🔘 body 2						
Fm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	I active force for joint	t jCrank_fle:	xbeam,, magnitude				
Fm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	I active force for joint	t jCrank_flex	kbeam,, magnitude				
Em(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_fle:	kbeam,, magnitude				
Fm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flex	kbeam,, magritude				
Em(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flet	deam,, magritude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flex	deam,, magnitude				
Em(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_fle: 图 1	kbeam,, magnitude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flet	kbeam,, magnitude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	tjCrank_flet	deam,, magnitude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flet	deam,, magritude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rea	active force for joint	t jCrank_flet	deam,, magritude				
IFm(jCrank_flexbeam, Fm(jCrank_fle Fm(jflexbeam) Rez	active force for joint	t jCrank_flet	deam,, magnitude				





- 9. 在仿真控制界面点击 Solver 页面,设置参数如下:
 - Solver = Park
 - Type of solving = Range Space Method
 - Simulation time = 2
 - Step size for animation and data storage = 0.001
 - Error tolerance = 1E-7
 - Computing Jacobian matrices = on
 - Block-diagonal matrices = off

Object simulation	n inspector				
XVA	Inf	ormation	FEM subs	ystems	Tools
Solver	Ident	tifiers	Initial conditions		Object variables
Simulation process	parameters	Solver optio	ns Type of coordina	tes for bodies	PP: Options
Solver BDF ABM Sear 2 Park Parallel Time Step size for animated Error tolerance Delay to real time Keep system models Computation of Block-diagon	t ation and data me simulation atrix decompo Jacobian nal Jacobian	Pe of solution Null space m Range space storage 0.0 1E	n nethod (NSM) e method (RSM) 2 🔟 201 -7		
Integratio	n		Message		Close

图 1.29





10. 点击 Integration 按钮开始仿真,在动画窗口可以观察机构的运动情况 (图 1.30),在绘图窗口可以观察支反力时程曲线 (图 1.31)。







读者可以打开位于{**UM Data**}**SAMPLES****Flex**目录的 **slider_crank_all** 模型, 对比不同建模方法的连杆对结果的影响,如图 1.32 所示。



图 1.32 红色曲线对应刚性连杆,蓝色曲线对应柔性连杆





2. 柔性平台-电机模型

本例的柔性平台-电机模型如图 2.1 所示。



图 2.1

柔性平台通过四个粘弹性力元与大地相连,电机多刚体模型作为一个外部子 系统导入,并与柔性平台通过四个粘弹性力元连接。电机转子上安装有一个偏心 轮,它的转动引起柔性平台振动。

刚柔耦合系统建模流程:

- 在ANSYS 软件里创建平台有限元模型;
- 将柔性平台导入 UM 模型;
- 创建柔性平台与大地的连接;
- 创建电机模型;
- 以子系统形式导入电机模型;
- 创建柔性平台与电机的连接。

动力学仿真分析内容:

- 各个力元的时程曲线;
- 柔性平台节点的垂向位移和加速度。
 模拟电机的工作模式:
- 启动 (角速度从0逐步增加);
- 匀速(角速度恒定);
- 关机 (角速度逐步减小至0)。

请先在工作目录创建两个文件夹 Vibrostand 和 Platform。

- .\Vibrostand (用于最终的刚柔耦合模型)
- .\Vibrostand\Platform (用于柔性平台子系统)





2.1 准备柔性平台

在 UM 软件里,每个柔性体都是作为一个独立的子系统存在,其类型为 Linear FEM Subsystem,标准格式文件为 input.fss,制作流程如下:

- 在 ANSYS 软件里创建平台有限元模型;
- 计算模态并输出 UM 所需的格式文件;

两种方式:

- 由 ANSYS_UM.EXE 程序直接生成 input.fss 文件。
- 先由 ANSYS_UM.EXE 程序生成 input.fum 文件,再利用 UM 的柔性子系统向导工具转换生成 input.fss 文件。使用柔性子系统向导的优势在于既能可视化观察每阶模态,还能手动剔除某些不需要的模态。

在{UM Data}\SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform 目录下有几个文件: input.fss、input.fum 和 PlatformShell63.ans 等。

- 如果没有 ANSYS 软件或者不想学习在 ANSYS 里的准备工作,那么请 直接从 2.1.3 章节开始阅读。请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\ Vibrostand\platform 目录复制 input.fum 文件到先前创建 的.\Vibrostand\Platform 目录。
- 如果想跳过所有准备弹性体文件的步骤,可以直接从 2.2 章节开始阅读。 请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform 目录复 制 input.fss 文件到.\Vibrostand\Platform 目录。





2.1.1 在 ANSYS 环境里工作

在开始前,请确认已经按 1.1 章节的操作配置好了 ANSYS 工作环境。 接下来进行如下操作:

- 请读者先从{UM Data}\SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform 目录复制 文件 PlatformShell63.ans 到.\Vibrostand\Platform 目录。
 PlatformShell63.ans 文件是采用 ANSYS 的 APDL 命令编写的,可自动 完成建模。
- 运行 ANSYS APDL Product Launcher,设置.\Vibrostand\Platform 为当 前工作目录。
- 3. 点击 RUN,运行 ANSYS 经典界面。
- 选择菜单 File | Read Input from,选择命令流 PlatformShell63.ans,程 序自动完成平台建模。

备注: 平台有两根 1m 长的梁和中间一块板组成,共有 4224 个 SHELL63 单元, 单元尺寸为 5cm。读者可以用记事本打开 PlatformShell63.ans 文件,修改模型参数。与大地相连的四个节点选作界面节点。

- 5. 建模完成后自动运行 um.mac 宏命令,计算出 24 阶静模态和 10 阶固有 模态。
- 随后, ANSYS_UM.EXE 程序自动运行, 请读者按 1.2.1 章节第 5-8 步骤 进行转换, 生成 input.fum 文件。
- 清注意,在转换页面,当勾选 "Save to the same directory"后若 Target directory 显示路径为 "D:\Models\Vibrostand\Platform\Platform",可 将其修改为 "D:\Models\Vibrostand\Platform"。





2.1.2 在 ANSYS Workbench 环境里工作

1. 适用于 ANSYS 经典界面的命令流文件 PlatformShell63.ans 不可直接用 于 ANSYS Workbench 环境。我们需要用记事本打开,删除以下与 UM 有关的代码,并保存文件:

NSEL,s,,,ALL ESLN,s,0,ALL CM,ESTRS,ELEM ESEL,ALL NSEL,ALL KSEL,S,,,5 KSEL,A,,,11 KSEL,A,,,105 KSEL,A,,,111 NSLK,S UM,10,1,1,1

运行 ANSYS 经典界面,选择菜单 File | Read Input from,读入修改后的 PlatformShell63.ans; 然后选择菜单 Preprossor | Archive Model | Write,输出 Platform.cdb 文件,设置如图 2.2 所示,然后关闭经典界面。

ANSYS Multiphysics Utility Menu (Platform)		
<u>File Select List Plot PlotCtrls Work</u>	Plane Parameters Macro MenuCtrls Help	
D 🛎 🖬 🔊 🎒 🍻 🔋 🔟		- I 🛃 🖬 🗐
Toolbar		
SAVE_DB RESUM_DB QUIT POWRGRPH		
Main Menu 🛞		
Main Menu (*) Preprocessor Breprocessor Brearcocessor Brear Type Brear Constants Material Props Sections Bodeling Checking Ctrls Archive Nodel Title Read Coupling / Ceqn Multi-field Set Up Loads Physics Brath Operations Solution Schurden General Postpro TimeHist Postpro Bradition Opt Session Editor Finish	Image: style styl	
	Platform.iges	
	OK Cancel Heb	

图 2.2





- 运行 ANSYS Workbench,在左侧 Component Systems 工具箱列表双击 Finite Element Modeler。这样就在右侧的 Project Schematic 区域生成 了一个空的有限元建模项目 A。
- 4. 选中 Model 点右键,选择 Add Input Mesh | Browse,选择之前创建的 Platform.cdb 文件,如图 2.3 所示。







6. 选中 Model 点右键,选择 Manage Input Meshes,点击 Platform,然后 在第6行选择 SI 国际单位制,如图 2.4 所示。

Outline o	f Schematic A2: Model A	▼ џ	×
1	🖃 🎯 Assembly Mesh		
2	platform		
Propertie	s of Outline A2: UserInput	Mesh 🔻 🕈	X
	А	В	
1	Property	Value	
2	Mesh Source		
3	Mesh File Name	platform.cdb	
4	Mesh File Format	Mechanical APDL Input	
5	Importation		
6	Unit System	SI (kg,m,s,K,A,N,V)	•
7	Body Grouping	SI (kg,m,s,K,A,N,V)	
8	ID Handling	Metric (kg,m,s,°C,A,N,V) Metric (tonne,mm,s,°C,mA,N,mV) U.S.Customary (Ibm,in,s,°F,A,Ibf,V)	
		U.S.Engineering (Ib,in,s,R,A,Ibf,V)	
		Metric (kg,mm,s,°C,mA,N,mV)	
		Metric (kg,µm,s,°C,mA,µN,V)	
		U.S.Customary (lbm,ft,s,°F,A,lbf,V)	
		Consistent CGS	
		Consistent NMM Consistent uMKS	
		Consistent BIN	
		Consistent BFT DesignModeler Unit System (m. degree)	、
		Designificatier onic System (in, degree)	/
		图 2.4	





- 在左侧 Analysis Systems 工具箱列表双击 Modal, 创建一个模态分析项目 B。
- 8. 从有限元建模项目 A 选中 Model 并拖至模态分析项目 B 的 Model,将 两个项目联系起来,如图 2.5 所示。





- 9. 选中模态分析项目 B 的 Model 点右键,选择 Update,更新模型。
- 10. 选择菜单 File | Save,保存项目。
- 11. 双击模态分析项目 B 的 Model,进入有限元模型,缩放合适窗口,如图 2.6 所示。



图 2.6





12. 从模型树依次选中 Modal 点右键,选择菜单 Insert | Commands,插入 以下 APDL 命令,如图 2.7 所示:
/UNITS, SI
NSEL,s,,,ALL
ESLN,s,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,A,,,730
NSEL,A,,,2659
NSEL,A,,,958
UM,10,1,1,1

其中,2435、730、2659 和 958 是柔性平台的界面节点编号,对应原始命令 流文件 PlatformShell63.ans 里的关键点 5、11、105 和 111。









13. 选中模型树里的 Solution 点右键,选择菜单 Solve,开始计算。

14. 此时,请先关闭自动弹出的 ANSYS_UM.EXE 程序。

utline # Filter: Name • Project Model (R2)		ANSYS
Image: Second State Stat	Creating data set for simulation of flexible body File Options: Sensors ANSY'S results file (".rit) D'. Models Mickean III Im Taged directory Taged directory Taged directory D'. Models Mickean Mickean	, ↓
etails of "Solution (B5)" 4 Adaptive Mesh Refinement Max Refinement Loops 1.	Create Close	Z X
Refinement Depth 2. Information	Graph 📮 Tabular Data	ą.
Status Solve Re Post Processing Calculate Beam Section Results No	ANSYS Workbench Solution Status 82 Overal Progress Writing Results Fle Stop Solution	

图 2.8

15. 关闭 ANSYS Workbench,最后得到的.rst 和.free 文件位于项目路径下的.\dp0\SYS\MECH 目录。





16. 手动运行 UM 安装目录下的 ANSYS_UM.EXE,选择.rst 文件(缺省名 字为 file),按图 2.9 进行设置,生成 input.fum 文件。

File Options Sensors	
ANSYS results file (*.rst):	
D:\Models\Vibrostand\Platform\Platform_files\dp0\SYS\MECH\file.rst	
Save to the same directory	
Target directory:	
D:\Models\Vibrostand\Platform\Platform_files\dp0\SYS\MECH\file	<u>2</u>
Create Close	
Creating data set for simulation of flexible body	× *
File Uptions Sensors	
Normalize modes	
Frequency: 0.500	
Create	
Creating data set for simulation of flexible body	×
Creating data set for simulation of flexible body	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by List of sensors	x
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS Oursensors.lst	x
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS umsensors.lst Include solutions for elements:	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS O umsensors.lst Include solutions for elements: Stresses	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS Oumsensors.lst Include solutions for elements: Stresses Strains	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS unsensors.lst C List of sensors defined in ANSYS program Include solutions for elements: Stresses Strains Delata fist after terreformation	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by ANSYS O umsensors.lst C Stresses S Strains Delete list after transformation	X
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors List of sensors is defined by List of sensors ANSYS umsensors.lst Include solutions for elements: Stresses Strains Delete list after transformation	
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by • ANSYS • umsensors.lst Cetter in ANSYS program Include solutions for elements: Cetter in ANSYS program Stresses Strains Delete list after transformation	
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by • ANSYS • umsensors.lst Cetter in ANSYS program Include solutions for elements: Cetter in ANSYS program Include solutions for elements: Stresses Image: Stresses Stresses Delete list after transformation Stresses	
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by	
Creating data set for simulation of flexible body File Options Sensors List of sensors is defined by Include solutions for elements: Include solutions for elements: Stresses Strains Delete list after transformation	

- 图 2.9
- 17. 将生成的 input.fum 文件复制到.\Vibrostand\Platform 文件夹下。





2.1.3 柔性子系统向导

利用 UM 的柔性子系统转换中间格式文件 input.fum 为最终的 input.fss 文件。 请读者参考 1.2.2 章节的方法步骤,将.\Vibrostand\Platform 里的 input.fum 文件转换为 input.fss 文件,并存放于同一目录。







2.2 刚柔耦合系统动力学建模与仿真

运行 UM Input 程序,新建一个模型。

2.2.1 导入柔性平台

- 1. 先在左侧模型树选中 Subsystems, 然后在右侧交互界面点击按钮+, 添加一个子系统。
- 2. 从 Type 下拉菜单选择 Linear FEM subsystem,在弹出的对话框选 择.\Vibrostand 下的 Platform,点击 OK,导入柔性平台子系统。在 Solution | Modes 页面可以观察柔性体的各阶模态。

				~
6	Read FEM model of	object		
S	can the forder:			
D	: Models \Vibrostand			<i>d</i>
	■ …	and	Data imported from program Name of solution: Platform 01.03.2021, 11:44:39, Platfor Nodes: 4425 Finite elements: 4224 Degrees of freedom: 26550 Normal modes: 28 Static modes: 0 Computation with consistent Min. natural frequency: 14.6 Max. natural frequency: 365 Generalized mass matrix: No Generalized stiffness matrix	: ANSYS1 prmModi mass ma 55 55 58.59 : No
ī	:\Models\Vibrostand\Platf	orm		
	01	-		-
	Canc			•
重命名为	J Platform .	图 2.11	1	
				0.2
1	Name: Platfo	orm	+ 🕩	Ì
	Type: 🌆 L	inear FEM sul	osystem	•
	Comments/Te	ext attribute (c	

图 2.12





2.2.2 连接柔性平台与大地

柔性平台四个角与大地通过四个粘弹性力元连接。下面我们先创建几何图形, 再定义力元。

2.2.3 创建几何图形

- 1. 先在左侧模型树选中 Images, 然后在右侧交互界面点击按钮 , 添加 一个几何图形。
- 2. 重命名为 Damper。
- 3. 点击按钮 , 设置 Bipolar GO 参数如图 2.13 所示。

Conic: D	amper 🔗	ŧ (±)	
Comment	s/Text attribute C		
Descriptio	n GO position Bipolar GO		
Length:	0.05		C
	0		C
Bottom:			10



- 4. 点击 Description 页面,点击 Type 一栏的按钮 +,添加一个图形元素,
 - 如图 2.14 所示。

Name:	Damper			ø	+	Ð	Û
Comme	ents/Text attrib	oute C			-		_
Descrip	tion GO posit	tion Bipolar GC)				
(none)				•	+	Ð	Î
Comr	not stretch nents/Text attr	ribute C					







5. 从 Type 下拉菜单选择 Spring。

Desc	cription GO position Bipo	lar GO	
(no	ne)		
	pe: Do n ● Ellipse ■ Box (\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\		+
	✔ Link♥ Plate		
	😭 go		
6. 设置 S	Spring 几何参数如图 Description GO position	图 2.15 图 2.16 所示。 Bipolar GO	
	Type: 💈 Spring		F 手 🛍
	Comments/Text attribu	te C	
	I		
	Do not stretch		
	Parameters Colors G	E position Material	
	© Left	Right	
\smallsetminus	Radius:	0.015	C
	Height:	0.05	
	Bar diameter (d):	0.005	
	Number of coils:	5	2
	Coil discretization:	20	<u>1</u>
	Bar discretization:	10	14

图 2.16





7. 点击 Type 一栏的按钮+,添加一个 Cone 类型,如图 2.17 所示。

-	Description GO	position Bipolar GO	
	Spring Cone		
	Type: 💧 Cor	ne 🛛 🛨 🕩	1
	Comments/Text	attribute C	
	Do not streto	h	
	Parameters Co	olors GE position Material	
	Radius (R2):	0.005	C
	Radius (R1):	0.005	C
	Height (h):	0.05	C
	Number of poin	ts	
	Bottom circle:	20	2
	Generatrix:	2	24
	Angles: 0.00	0.00	24
	Closing:	(none)	•
8. 再添加-	一个 Cone 类 Description GO Spring Cone	型的 GE,并设置参数如图 2 position Bipolar GO	.18 所示。
/	Type: 🔥 Co	ne v 1 + +	h mi
	Comments/Tex	t attribute C	
\langle / \rangle	Do not stret	ch	
	Parameters C	olors GE position Material	
	Radius (R2):	0.01	C
	Radius (R1):	0.01	C
	Height (h):	0.02	C
	-Number of poir	Its	
	Bottom circle:	10	1
	Generatrix:	2	1
	Angles: 0.00	0.00	
	Closing:	(none)	•

图 2.18





9. 在第二个	~Cone 的 GE Position	页面,设置位置参数,如图 2.1	9所示。
	Description GO position Bipola	ar GO	
	Spring Cone Cone		
	Type: 💧 Cone	→ 1 +	
	Comments/Text attribute C		
	Do not stretch		
	Parameters Colors GE positi	on Material	
	Translation		
	7: 0.015		
	Rotation		
	Shift after rotation		
	x:		
	у:		
	z:	<u>C</u>	
	图	2.19	
10. 设置两个	Cone 以不同颜色显示	示,如图 2.20所示。	
Description GO position	Bipolar GO	Description GO position Bipolar GO	
Spring Cone Co	ne	Spring Cone Cone	
-			m
Type: 🔥 Cone		rype: Z Cone	
Comments/Text attribu	ite C	Comments/Text attribute C	
		Do not stretch	
Do not stretch	E position Material	Parameters Colors GE position Material	
	in to all CE	Hide Assign to all GE	
	Emissive		
	Emissive		
Specular Assist	Ampient	Assian color from list:	
Assign color from list:			-
Shininess: 4	4	Shininess:	4
		Visible side	
Both OF	ront 🔘 Back	🔘 Both 💿 Front 🔘 Back	
Wired		Wired	
Width of curves: 1	2	Width of curves: 1	\mathbf{Z}
	反	2 2 0	
	王	4.40	

Universal Mechanism 9

Getting Started





2.2.4 创建力元

- 1. 先在左侧模型树选中 Linear Forces, 然后在右侧交互界面点击按钮 。
- 重命名为 Damper_FL,保持缺省类型 Viscous-elastic,选择 Base0 作为 Body1,选择 Platform.Platform 为 Body2,选择 Damper 作为 GO,如 所示。
- 在 Body1 页面设置 Base0 的下连接点 Point A 坐标:(BeamLength/2, WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2, -0.05),参数符号赋初值: BeamLength=1.0,WidthShelf=0.4,WidthBeamShelfLow=0.1。
- 4. 在 Body1 页面设置 Base0 的上连接点 Point B1 坐标: (BeamLength/2, WidthShelf/2+ WidthBeamShelfLow/2, 0), 如图 2.21 所示。

Name:	Damper_FL				+ 🕩 🗊
Comm	nents/Text attribute C				
Body 1	:		Body2:		
Base0		-	Platform.platform	I	-
Type:	Viscous-elastic				
GO: (Damper				•
Positio	on Parameters				
		Compute f	or the 2nd body		
Au	itomatic computation for 2nd body				
Body	1 Body2				
Syster	m of coordinates at pt. A (SCA)				
1 2 E	BeamLength/2	C WidthShelf/2+Wid	thBeamShelfLow/2	C -0.05	C
	• 0.0000000				1
	▼ 0.00000000				1
	• 0.0000000				2
Point	B1 - the end of element:				
\$	BeamLength/2	C WidthShelf/2+Wid	thBeamShelfLow/2	C	C
I					

图 2.21





5. 在 Body2 页面设置 Platform.Platform 连接点 Point B2 (对应 Base0 的 Point B1) 坐标为: (BeamLength/2, WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2, 0), 如图 2.22 所示。

-	Automatic computation for 2nd body	
Bod	body2	
Syst	em of coordinates at pt. B2 (SCB2)	
٦,	BeamLength/2 C WidthShelf/2+WidthBeamShelfLow/2 C	С
	0.0000000	1
	• 0.0000000	
	• 0.0000000	1

图 2.22

 点击 Parameters 页面 Stiffness matrix 一栏的按钮^{...},按图 2.24 所示设 置刚度参数,并赋初值 cxx=1e6, cyy=1e6, czz=1e6, 点击 OK。

Position Parameters		
Stationary force		
		C
Iinear	🔘 Bilinear	
Stiffness matrix:	(presented)	
Damping matrix:	(presented)	
	图 2.23	
Matrix of li	near force element	×
Elements		

coordinate-coordinate		c	oordinate-angle		
CXX C	C	C	C	C	C
С суу			C	C	C
C	C czz	C	C	C	C
angle-coordinate		a	ngle-angle		
C	C	C	C	C	C
C	C	C	C		C
	C		C		C
				ОК	Cancel

图 2.24





7. 点击 Parameters 页面 Damping matrix 一栏的按钮[□],按图 2.25 所示 设置阻尼参数,并赋初值 dxx=1e3, dyy=1e3, dzz=1e3, 点击 OK。

Matrix of lir	near force el	ement				Х
Elements coordinate-coord	inate			coordinate-angle		
dxx C		C	C	C	C	C
C	dyy	C	С	C	C	C
C		C dzz	С	C	C	C
angle-coordinate				angle-angle		
C		C	С		C	C
C		C	С	C	C	C
C			С	C	<u> </u>	C
					ОК	Cancel
			图:	2.25		

- 8. 点击最上方的按钮 ,复制生成第二个力元。
- 9. 重命名为 Damper_FR。
- 10. 设置 Body1 的两个连接点坐标分别为:(BeamLength/2, -WidthShelf/2
 WidthBeamShelfLow/2, -0.05),(BeamLength/2, -WidthShelf/2 WidthBeamShelfLow/2, 0)。
- 11. 设置 Body2 的连接点坐标为: (BeamLength/2, -WidthShelf/2 WidthBeamShelfLow/2, 0)。
- 12. 以同样的方法定义另外两个阻尼力元 Damper_BL 和 Damper_BR,并 修改相应的连接点坐标(由于模型对称,只需修改符号)。





2.2.5 导入电机子系统

这里我们将直接调用现有的电机多刚体模型,模型位于{UM Data}\SAMPLES\Flex\electricmotor。

- 1. 先在左侧模型树选中 Subsystems,然后在右侧交互界面点击按钮 ♣。
- 2. 从 Type 下拉菜单选择 Included 类型,并加载模型{UM Data}\ SAMPLES\Flex\electricmotor,如图 2.26 所示。







4. 在 Position 页面设置电机子系统的方位,如图 2.27 所示。

e: 📕 included		•
Comments/Text attribute C		
	Edit subsystem	
eneral Position Identifiers		
Translation		
x:		С
y: -0.0148		С
z: 0.13		С
Rotation		
X -90.0000000		1
• 0.00000000		
• 0.00000000		1
Translation after rotation		_
x:		С
y:		С
z:		С





2.2.6 设置电机转子速度曲线

在电机模型里定义了如图 2.28 所示的角速度曲线,由图可知,电机启动时,转速从0开始线性增加,稳定工作一段时间,再线性降速至0。







我们可以进入电机子系统查看参数设置。

- 1. 在电机子系统页面点击 Edit subsystem,进入子系统。
- 2. 选择 Joint | jRotor->Body, 这是一个 Generalized 类型的铰。
- 3. 点击较的 RTx 页面,显示类型为 Table,如图 2.29 所示,是以表格形 式定义的分段函数。

表 2.2

序号	时间区间	函数表达式
1	Tstart	0
2	tstart+tspeeding_up	(omega/tspeeding_up)*sqr(t-tstart)/2
3	tstart+tspeeding_up+tworking	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+
		ome-ga*(t-tstart-tspeeding_up)
4	tstart+tspeeding_up+tworking	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+
	+tbraking	omega*tworking+omega*(t-tstart-tspeeding_u
		ptworking)-(omega/tbraking)*
		sqr(t-tstart-tspeeding_up-tworking)/2
5	100	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+
		omega*tworking+omega*(tworking)-(omega/
	1	tbraking)*sqr(tbraking)/2

Name: jRotor>Body	+ 🕀 🛍 🗸
Body 1:	Bodv2:
Rotor	▼ Body
Type: Seneralized	
TC RCy RTX TC	
Enabled	+ +: 🔃 🗊
ET type: 🏏 rt (rotational t-function)	•
Comments/Text attribute C	
Transformation vector	
axis X : (1,0,0)	•
ex: 1	n
ey: 0	n
ez: 0	In
Type of description	
© Expression	File
Function	Curve
Time-table	
et e e e	
Т	Function of time
tstart	0
tstart+tspeeding_up	(omega/tspeeding_up)*sqr(t-tstart)/2
tstart+tspeeding_up+tworking	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+omega*(t-tstart-tspeeding_up)
tstart+tspeeding_up+tworking+tbraking	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+omega*tworking+omega*(t-tstart-tspeeding_up-tworking)-(omega/tbraking)*sqr(t-tstart-tspeeding_up-tworking)/2
100	(omega/tspeeding_up)*sqr(tspeeding_up)/2+omega*tworking+omega*(tworking)-(omega/tbraking)*sqr(tbraking)/2

图 2.29

4. 点击 Cancel,不做任何修改,退出子系统。





2.2.7 连接电机与柔性平台

柔性平台与电机之间的连接和其与大地之间的连接非常相似,也是通过四个 粘弹性力元连接。连接物体是 **Electricmotor.Body** 和 **Platform.Platform**,如图 2.30 所示。

Name: DamperMotor_FL + 💽 觉	Name: DamperMotor_FL +	前
Comments/Text attribute C	Comments/Text attribute C	_
Body1: Body2: Electricmotor.Body ▼ Platform.platform ▼ Type: Siscous-elastic ▼	Body 1: Body 2: Electricmotor.Body Velatform.platform	•
GO: Damper	GO: Damper	,
Compute for the 2nd body	Compute for the 2nd body	
Body1 Body2 System of coordinates at pt. A (SCA)	Body1 Body2 System of coordinates at pt. B2 (SCB2)	
	\$ 0 C 0.075 C 0.06	C
• 0.0000000 24	X -90.0000000 ▼ 0.0000000	2
0.0000000 24 Point B1 - the end of element:	• 0.0000000	1
¶ 0 C 0.07 C 0.0899 C		

图 2.30

请读者对照表 2.3 中的坐标点定义四个 Linear Force 力元。

表 2.3

力差欠秒	Elec	ctricmotor.B	ody	Platform.Platform			
刀儿石柳	Х	Y	Ζ	Х	Y	Ζ	
DamperMotorFL	0	0.05	0.0899	0	0.075	0.06	
DamperMotorFR	0	0.05	-0.06	0	-0.075	0.06	
DamperMotorBL	-0.0875	0.05	0.0899	-0.0875	0.075	0.06	
DamperMotorBR	-0.0875	0.05	-0.06	-0.0875	-0.075	0.06	

请注意:对于每个力元的 Body1 需要输入两个坐标(PointA 和 PointB1),这里 四个力元的 PointB1 的 X 和 Z 坐标与 PointA 均相同,Y 坐标为 0.07。

请注意:电机子系统的局部坐标系与柔性平台并不一致,电机绕 X 轴转动了-90°,因此需要按图 2.30 所示设置,相应的刚度和阻尼矩阵如图 2.31 和图 2.32 所示,并赋初值: cStifflateral=1.0e6, cStifflongitudinal=1.0e6, cDisslateral=1.0e3。





Elements	- 24	1.tz					
coordinate-coo	rdi	nate			coordinate-angle		
cStifflateral	С	C		С	C	C	C
	С	cStifflongitudi/C		C	<u> </u>	<u>C</u>	C
ļ	С	C	cStifflateral	C	C	<u>[C</u>]	C
angle-coordina	te				angle-angle		
1	С	C		C	<u> </u>	C	C
1	С	C		С	C	C	C
1	С	C		С	<u>C</u>	C	C
							1
						OK	Cancel
				冬	2 31		
-							
Matrix of I	ine	ear force eleme	ent		and the second sec		
lements coordinate-coo	ordi	nate			coordinate-angle		
Disslateral	С	C		С	<u>D</u>	C	C
censsie der ei	C						
	С	cDisslongitudir ^C		C	C	C	C

图 2.32

angle-angle

С

C

С

C

C

C

OK

С

С

C

Cancel

完成以上设置后,请保存模型.\Vibrostand,关闭 UM Input 程序。

C

С

С

С

C

С

angle-coordinate

C

С

С





2.2.8 计算系统平衡位置和固有频率

- 1. 运行 UM Simulation 程序,并加载模型.\Vibrostand。
- 2. 程序会自动打开一个动画窗口,如果没有,请选择菜单 Tools | Animation window 打开。
- 3. 选择菜单 Analysis | Simulation, 打开仿真控制界面。
- 4. 根据需要,可以在 FEM Subsystems | Image 页面设置显示模式。
- 5. 点击 Close,关闭仿真控制界面。
- 6. 选择菜单 Analysis | Static and linear analysis, 弹出线性分析界面。
- 7. 在 Equilibrium 页面,点击按钮 ☉,计算系统平衡位置。
- 8. 在Initial conditions页面,点击按钮[□],保存当前平衡状态的坐标为 equilibrium.xv 文件。

备注:坐标对应当前参数配置下的模型的平衡状态,如果参数发生变化,则需要将坐标清零,重新计算平衡位置。

9. 在Frequencies/Eigenvalues页面,点击按钮 [●],计算模态,频率在左侧



图 2.33





10. 选中某阶模态,点击按钮,一,可在动画窗口显示振型动画;拖动

Amplitude和Rate的滑动条可以调节振动幅度和速度;点击按钮¹¹,可 停止播放动画。





11. 关闭线性分析工具。





2.2.9 运动仿真

- 1. 选择菜单Tools | Wizard of variables,打开变量向导。
- 2. 在Linear forces页面选中DamperMotor_BR,右侧选择Force分量Z,点

击按钮 [2], 创建变量并自动打开一个绘图窗口。

Angular Variables Inear Variables <t< th=""><th>Wizard of variables</th><th>f</th><th></th><th>Alera</th><th></th><th>. 11</th><th>M. D. U</th><th></th></t<>	Wizard of variables	f		Alera		. 11	M. D. U	
Coordinates Solver variables Image: All forces Image: All forces Image: Variables for group of bodies Image: Linear forces Image: Joint forces Image: Variables for group of bodies Image: Linear forces Image: Joint forces Image: Variables for group of bodies Image: Linear forces Image: Joint forces Image: Variables for group of bodies Selected Image: Joint forces Image: Damper_FR Damper_Motor_BR DamperMotor_BR Type Image: Damper_BL ObamperMotor_BR Image: Joint forces Rotation Image: Damper_Motor_BR DamperMotor_BR Image: Joint forces Rotation Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Rotation Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Rotation Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Rotation Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Image: Joint force Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Image: Joint force Image: DamperMotor_FR Image: Joint force Image: Joint force Image: Joint force <th></th> <th>Linear variables</th> <th>a+D Expression</th> <th>FE Sensors</th> <th>User va</th> <th>ariables</th> <th>React</th> <th>ons</th>		Linear variables	a+D Expression	FE Sensors	User va	ariables	React	ons
Image: Star group of bodies Image: Interior of test Image: Interior of test Image: Interior of test Image: Interior of group of bodies Selected Image: Interior of Group of BR DamperMotor_BR Image: Interior of Group of BR Type		Solver	variables	All forces			Identifiers	
Image: Selected Damper_FR Damper_FR Damper_BR Damper_BR Image: Selected Image: Damper BL Image: Selected Image: Damper Motor_BR Image: Selected Image: Damper Motor_BL Image: Selected Image: Damper Motor_FR Image: Selected Image: Selected Dam	Variables for grou	up of bodies	S LI	iear forces		IOL M	nt forces	-
Damper_FR Damper_FL Damper_BR Damper_BL DamperMotor_BR DamperMotor_BL DamperMotor_FL DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR DamperMotor_FR Component Omponent Or Component Or Compo	🖃 🔳 vibrostand	Selected						-1
Damper_FL Damper_BR DamperMotor_BR DamperMotor_BL DamperMotor_FL DamperMotor_FR DamperMotor_FR Component N Omponent N Optimized in SC of body Base0 Acts on Obdy 1: Body Doby 2: platform	Damper_FR	DamperMot	or_BR					
Damper_BR Damper BL DamperMotor_BR DamperMotor_BL DamperMotor_FL DamperMotor_FR DamperMotor_FR V Output Output Component N N Output N Output Output DamperMotor_BR DamperMotor_FR V Output Output Output DamperMotor_BR DamperMotor_BR DamperMotor_BR DamperMotor_BR DamperMotor_BR DamperMotor_BR Output DamperMotor_BR DamperMotor_BR </td <td>Damper_FL</td> <td>Туре</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	Damper_FL	Туре						
Damper_BL DamperMotor_BR DamperMotor_BL DamperMotor_FL DamperMotor_FR Image: DamperMoto	Damper_BR	Force	🔘 Torqu	e 💿 Displa	cement	Rot	tation	
OamperMotor_BR DamperMotor_BL DamperMotor_FL DamperMotor_FR O Z Resolved in SC of body Base0 Acts on O body 1: Body DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z	Damper_BL	Componen	nt					-
Outper Motor_FL Damper Motor_FR Image: Contract of December Motor_BR Image: Contrate Contrate Contract of December Motor_BR		© x		🔘 Magnitude				
DamperMotor_FR DamperMotor_FR Image: Constraint of the second s	DamperMotor FL	© Y		Vector				
Resolved in SC of body Base0 Acts on Image: DomperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z	DamperMotor_FR	() Z		Oynamic ratio	6			
Resolved in SC of body Base0 Acts on Image: Dob of the second								-
Base0 Acts on image: body 1: Body image: body 2: platform DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z		Resolved	n SC of body					
Acts on body 1: Body body 2: platform DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z		Base0					<u> </u>	
body 1: Body body 2: platform DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z		Acts on						
DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z		i body 1	: Body					
DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z		🔘 body 2	: platform					
(DamperMotor_BR):z Generalized linear force element (DamperMotor_BR) Force, projection Z								-11
II	(DamperMotor_BR):z	Generalized linea	ar force element (Dam	perMotor_BR) Force,	projection	Z	7	d
			/					
			图 2.35					
图 235								
图 2.35								





3. 打开仿真控制界面,在FEM subsystems | Image页面,用户可自由设置 单元和节点的显示特征,如图 2.36所示。

C-l	T.J	Territorial and Part	oka shara 11
Solver	Identifiers	Initial conditions	Object variables
XVA	Information	FE subsystems	loois
Subsystem: Platforn			
seneral Simulation	Solution		
Options Color			
Image parameters			
Draw nodes	10700101 000		
Uraw local coordinat	te system		
Sizes	• • 4		
Node image:	1 1		
Interface node:	1		
Selected node:	1 1		
Single node FE:	5 🏠		
Length of local axes:	5.00 1		
Integration		Message	Close
Integration	Y2///	Message 图 2.36	Close
Integration	YZ///	Message Image: Message Image: Message Image: Message	Close
Integration	Y ?///	Message Image: Second s	Close
Integration		Message E 2.36	Close
Integration		Message Image: State of the sta	Close
Integration		Message E 2.36	Close
		Message E 2.36	Close
Integration	<u> </u>	Message E 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close
Integration	<u> </u>	Message E 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close
Integration		Message E 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close
Integration		Message 2.36	Close





4. 在变量向导定义第**3941**号节点(坐标为: **0.05**, **0**, **0.06**)的垂向位移和 垂向加速度两个变量,并分别在一个绘图窗口显示。

Coordinates	Solver	variables	📫 All forces	id	Identifiers		
🥩 Variables for group	o of bodies	, 🔰 Li	near forces	ot 🔍	int forces		
🖌 Angular variables 🛛 🛃	Linear variables	a+b Expression	FE Sensors	User variables	🕆 Reactio	ns	
vibrostand	Selected						
🖶 🗹 Platform	platform					1	
platform	Coordinate	es of point in the boo	ly-fixed frame of refe	rence			
Electricmotor	1	0.05		0	0.06	4	
Body	1. St.					4	
Rotor	Туре					1	
Cover	Coording	Coordinate Dipolar vector					
	O Velocit	1	Bipo	lar velocity			
	C Acceler	C Acceleration					
	Componer	ıt					
	© x	© Y	() Z	© V 0	V (
	Resolved i	Resolved in SC of body					
	Base0	Base0 💌					
	Relative to	body				+	
Platform.platform)	Coordinates of p	oint (0.05.0.0.06) o	f body Platform.platfo	orm relative to Base0	, SC Basi	5	
•	1						

图 2.38

5. 在变量向导定义第3941号节点的应力分量SX1,并在绘图窗口显示。

Image: Second Secon	Coordinates	Solver	variables	📫 All forces	ic	Identifiers
Angular variables Inear va	🥩 Variables for group o	ofbodies	🖉 Lir	pear forces	🔍 🔍	oint forces
9333. Node 3933 () Selected 3934. Node 3934 (3935. Node 3935 (3935. Node 3935 (3936. Node 3936 (3937. Node 3937 (3938. Node 3938 (3939. Node 3938 (Node 3939 (3939. Node 3939 (Node 3940 (3934. Node 3939 (Stesses Strains 3938. Node 3938 (Node 3940 (3939. Node 3939 (Selected 3941. Node 3940 (Stesses Strains 3941. Node 3941 (Stesses Strains 3941. Node 3941 (Stesses Strains 3941. Node 3941 (Strains 3941. Node 3941 (Strains 3942. Node 3941 (Strains 3943. Node 3943 (Strains 3944. Node 3944 (Strains 3945. Node 3945 (Strains 3946. Node 3947 (Strains 3947. Node 3947 (Strains	🛕 Angular variables 🛛 🛃 L	inear variables	a+b Expression	🗊 FE Sensors	User variables	Reaction
	 3933. Node 3933 (3934. Node 3934 (3935. Node 3935 (3936. Node 3936 (3937. Node 3937 (3938. Node 3938 (3939. Node 3939 (3940. Node 3940 (3941. Node 3941 (3942. Node 3942 (3943. Node 3943 (3944. Node 3944 (3945. Node 3946 (3946. Node 3946 (Selected 3941. Node Stresses Kind of sol Nodal Element gro 1. SHELL 18 Resolve in Local SC of	3941 (0.050, 0.00 Strains Jution 31 (3601,3600,3569) the system of coordi f subsystem	0, 0.060)	ental	Component:

图 2.39





6. 在FEM subsystems | Simulation页面,保持Gravity选项为勾选状态,并 设置阻尼相关的系数a为0.001,b为0,如图 2.40所示。

Solver	Identifiers	Initial conditions	Object variables
XVA	Information	FEM subsystems	Tools
Subsystem: Pla	atform		
General Simulatio	n Image Solution		
Options Damping			
General	2		
Gravity			
Switch off all f	flexible modes		
iect simulation	inspector		
Colum	Identifiere	Initial conditions	Object veriables
Solver	Information	FEM subsystem	S Tools
AVA	form		TOOIS
UDSystem: Pid			
eneral Simulation	Image Solution		
)ptions Damping			
Damping			
📝 Internal dissipa	ition		
Type of definition	1		
Linear model			
Damping ratio	for each mode		
Linear model			
Linear model D=aC+bM			
Linear model D=aC+bM a: 0.001		<u>n</u> b: 0	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001		<u>n</u> b: 0	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001	1	n b: 0 图 2.40	n
Linear model D=aC+bM a: 0.001	1	n b: 0 图 2.40	n
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	n
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	n
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	<u>n</u>
Linear model D=aC+bM a: 0.001		n b: 0 图 2.40	<u>n</u>





- 7. 在Identifiers页面,从下拉菜单选择子系统Vibrostand.Electricmotor, 并设置以下参数:
- nu=1620
- tstart=0.5
- tspeeding_up=2
- tworking=3
- tbraking=4

备注:转子的转动频率超过了系统的前两阶固有频率,因此在后面仿真时启动阶 段会出现共振现象。

Object simulation	inspector					
XVA	Inform	nation	FEM subsy	FEM subsystems		
Solver	Identifie	rs	Initial conditions		Object variables	
List of identifiers	dentifier control					
	vibrostand.Ele	ctricmotor			•	
Whole list						
Name	Expression	Value	Comment			
cStifflateral	1.000000E+6		Lateral stiffne	ess of mount e	le	
cStifflongitudinal	1.000000E+6		Longitudinal s	Longitudinal stiffness of mour		
cdisslateral	1000		Lateral dissip	Lateral dissipation of mount e		
cdisslongitudinal	1000		Longitudinal d	dissipation of m	0	
nu	1620		Nominal angu	lar velocity of	th	
omega	nu*2*pi/60	169.646	Nominal angu	lar velocity of	th	
tstart	0.5		Time before s	Time before speeding up, s		
tspeeding_up	2		Time of speed	Time of speeding up mode, s		
tworking	3		Time of worki	Time of working mode, s		
tbraking	4		Time of braki	Time of braking mode, s		
Integratio	on	١	Message		Close	

图 2.41





- 8. 在Solver页面设置求解器参数如下:
- Solver = Park
- Type of solving = Range Space Method (RSM)
- Simulation time = 10
- Step size = 0.002
- Error tolerance = 1E-8
- Computing Jacobian Matrices = ON
- Block-diagonal matrices = OFF

Object simulation inspector					
XVA	Information		FEM subsy	FEM subsystems	
Solver	Identifiers		Initial conditions		Object variables
Simulation process parameters		Solver options	Type of coordinates for bo	odies PP: Op	otions
Solver Type of solution BDF ABM Gear 2 Park Brailel Time t > 10 Step size for animation and data storage 0.02 Error tolerance IE-8 Delay to real time simulation Keep system matrix decomposition Computation of Jacobian Block-diagonal Jacobian					
Integration			Message		Close
			图 2.42		





9. 点击Integration按钮开始仿真,结果如图 2.43所示。







图 2.43





10. 读者可以将绘图窗口的变量复制为静态变量,以便于对比分析。



- 11. 点击Interrupt。
- 12. 在图 2.40所示界面勾选Switch off all flexible modes。
- 13. 点击Integration,再次进行仿真。



图 2.45 蓝色曲线对应柔性体, 红色曲线对应刚体