

Getting started



UM 软件入门系列教程

(01)

四川同算科技有限公司 译

2021年3月

本教程通过几个简单的机械系统模型引导读者学会**Universal Mechanism** (以下简称**UM**)软件最基本的多体系统运动学和动力学建模和仿真方法,主 要用到**UM Base**基础模块,请务必一步一步按顺序阅读和操作。

虽然公路车辆、履带车辆、铁路车辆等专业模块有其特别的地方,但基本 的建模和仿真方法都是相同的,这些基本方法将在本教程中演示。

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:

http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=3.

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.	单摆模	甦	1
1.1	课程	呈内容	1
1.2	模型	2简介	2
1.3	建模	<u> </u>	3
	1.3.1	运行 UM Input 程序和新建模型	3
	1.3.2	熟悉 UM Input 程序建模界面	3
	1.3.3	创建几何图形	4
	1.3.3.1	场景的几何图形	4
	1.3.3.2	单摆的几何图形	8
	1.3.4	创建刚体	9
	1.3.5	创建铰	. 10
	1.3.6	保存模型	. 11
	1.3.7	运行 UM Simulation 程序	. 11
1.4	仿真	[.12
•	ᅭᆂᇩ		
2.	日田加	成刘与支迫振动	19
2.1	课程	呈内容	19
2.2	模型	2简介	19
2.3	建模	<u>*</u>	20
	2.3.1	运行 UM Input 程序和新建模型	. 20
	2.3.2	创建几何图形	. 21
	2.3.3	创建刚体	. 25
	2.3.4	创建铰	. 27
	2.3.5	创建力元	. 30
	2.3.6	弹簧和阻尼力元的可视化	. 31
	2.3.7	附加参数	. 33
	2.3.8	准备仿真	. 34
2.4	仿真	Ļ	35
	2.4.1	自由振动	. 35
	2.4.2	统计分析	. 41
	2.4.3	静态和线性分析	. 42
	2.4.4	受迫振动	. 44
3.	悬臂梁	<u>ک</u>	.46
31	课程	呈内容	46
3.2	~ 植刑	- , - , - , - , - , - , - , - , - , - ,	46
3.2	八王 建桓	<u>z</u>	47
5.5	又(人	· 们建几何图形	47
	337	创建刚休	49
	333	创建较	50
	334	准备仿直	54
	5.5.1		

目 录

3.4	仿真		55
	3.4.1	计算平衡位置	55
	3.4.1.1	解析法直接求解平衡方程	55
	3.4.1.2	运动方程数值积分求解	56
	3.4.2	计算固有频率和振动模态	58
	3.4.3	欧拉临界力	61
	3.4.4	大变形	64
4.	后续学	2习课程	70
5.	参考文	献	71





1. 单摆模型

1.1 课程内容

本课程演示使用 UM 软件进行多体系统建模和仿真的基本流程。通过本课程的学习,读者将学会如何新建模型、创建几何、刚体和铰,以及如何通过数值 仿真计算获得动力学模型的各种特性曲线。

本课程我们将完成一个经典的单摆模型(读者可以在本地路径 {UM Data}\SAMPLES\TUTORIAL\pendulum 找到这个模型)¹。这个模型由一个刚体 (Pendulum)、一个转动铰(Rotational Joint)和一个场景图形(Support)组成, 如图 1.1 所示。在完成建模工作后,我们将设置初始条件并进行数值仿真计算。



图 1.1 单摆模型

备注: UM 软件的工作目录 {UM Data}路径缺省位于 C:\Users\Public\ Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\9,安装时无法修改,待安装 完毕后用户可以在 UM Input 程序界面进行修改该路径(Tools-Options-Working directory)。

 ^{*} 读者也可以从官方网站下载模型 <u>http://www.umlab.ru/download/90/eng/pendulum.zip</u>
 Universal Mechanism 9





1.2 模型简介

我们建议读者在使用 UM 软件进行建模之前, 先动手绘制机构原理简图, 如 图 1.2 所示。

由简图可看出,这里有一个刚体和两个坐标系,其中 OX₀Y₀Z₀ 为全局(总体)坐标系(记为 SC₀), C₁X₁Y₁Z₁ 为刚体的局部(连体)坐标系(记为 SC₁)。转动铰中心位于 SC₀ 原点, SC₁ 原点设置在单摆质心处,且其坐标轴沿着单摆的惯性主轴。我们通常认为模型的全局坐标系与大地相连接。在这里,单摆和全局坐标系通过一个转动铰连接。







1.3 建模

1.3.1 运行 UM Input 程序和新建模型

运行 UM Input 程序

依次单击 开始 | 所有程序 | Universal Mechanism 9 x64 | UM Input。
 或:双击桌面快捷方式 UM Input。

新建一个模型

1. 选择菜单 File | New object,新建一个 UM 模型,如图 1.3 所示。

1.3.2 熟悉 UM Input 程序建模界面

请先用几分钟的时间熟悉一下 UM Input 程序建模界面,如图 1.3 所示。



图 1.3 UM 建模界面

模型树:位于界面左侧上部,用于访问模型里的各种元素。

参数表: 位于界面左侧下部, 用于显示和编辑自定义的标识符及表达式。

动画窗口:位于界面中央,用于显示整个模型或单个元素。窗口缺省显示 全局坐标系(右手定则):<u>红色为X轴</u>,绿色为Y轴,蓝色为Z轴。通过窗口上 部工具栏的图标可进行视角调整、缩放和其它设置,通过鼠标右键菜单可设置 透视和网格参数等。

交互界面:位于界面右侧,用于输入和修改当前元素的所有参数。Universal Mechanism 93Getting Started





1.3.3 创建几何图形

我们建议读者在建立任何动力学模型时都从几何图形(GO)建模开始。

1.3.3.1 场景的几何图形

创建第一个几何图形: Scene

UM 里的 Scene 指的是场景(注: UM 有个专门的模块用于制作复杂的三维场景),它用于赋给模型中始终与大地(全局坐标系)固接的元素。使用方法:先创建一个几何图形,再设置为 Scene 即可。请注意,并非每个模型都需要定义场景。在本例中,场景几何为 Support,也就是单摆铰接的地方。请按如下操作进行设置。

1. 先选中**模型树**里的 Images,然后点击交互界面的加号按钮 [◆],新建



图 1.4 添加一个元素

备注: UM 软件里添加任何类型的元素 (几何、刚体和力元)都可采用这种方法。

重命名几何图形

在 UM 里新建一个元素时,程序会对其自动命名,缺省命名规则是"英文缩 写+数字编号",且这个数字编号在这一类元素中是唯一的。

第一步创建的几何图形自动命名为 GO1, 我们将其更改为 Support (支持中 文命名), 如图 1.5 所示。



Universal Mechanism 9

Getting Started





组装几何图形

在 UM 中,每一个几何图形 (GO)可以由若干个基本的图形元素 (GE)组合而成 (GO=GE1 + GE2 + …)。组合的方式就像搭积木,无需考虑几何干涉和 布尔运算,因此读者可以随意创建非常复杂的几何图形。这里,我们创建一个包含三个基本元素的几何体 Support: Ellipsoid (球体)、Cone (锥体)和 Box (块体)。

创建第一个图形元素: Ellipsoid

单击图 1.5 所示的"添加一个图形元素"按钮(注:第二行的加号),出现 第一个图形元素 GE1 界面,如图 1.6 所示。



- 1. 从 Type 下拉菜单选择图形元素类型 Ellipsoid。
- 2. 切换到 Parameters 页面,设置参数 a = b = c = 0.05。
- 3. 切换到 Color 页面,设置颜色 Diffuse 为红色。

创建第二个图形元素: Cone

 单击图 1.5 所示的"添加一个图形元素"按钮(注:第二行的加号), 从 Type 下拉菜单选择图形元素类型 Cone。

备注:请勿点击第一行的加号按钮,否则会创建另一个几何图形。现在我们只需要创建一个几何图形 Support,它由三个图形元素组成:Ellipsoid、Cone 和 Box。





- 2. 切换到 Parameters 页面,设置参数 R2 = 0.1; R1 = 0; h = 0.15。
- 3. 切换到 Color 页面,设置颜色 Diffuse 为红色。

创建第三个图形元素: Box

- 1. 单击图 1.5 所示的"添加一个图形元素"按钮(注:第二行的加号), 从 Type 下拉菜单选择图形元素类型 Box。
- 2. 切换到 Parameters 页面,设置参数 A = 0.5; B = 0.5; C = 0.05。
- 3. 切换到 GE Position 页面(注:不是 GO position),设置垂向移动距离 Translation | Z 为 0.15,如图 1.7 所示。

Name:	Support		ø +	Ð	Î	$\boldsymbol{\Sigma}$
Comme	ents/Text attribut	e C				
Descrip	tion GO position	n				
Box						
Type	Paul Reve		–	E 1	a	
Type.	Box	• •	Т	4 - 1		
Com	nents/Text attrib	ute C				
Parar	neters Colors	GE position	Material			
Tran	slation				С	
					C	
y.	. 15					
2:	/. 15					
Rota	-				C	
					C	
	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •					
Shift	after rotation				С	
^					C	
1 T						

图 1.7 设置图形元素位置





定义 Support 为场景几何

- 1. 选中左侧模型树的 Object。
- 2. 在右侧**交互界面**的 General 页面 Scene image 下拉菜单选择 Support 作 为本模型的场景,如图 1.8 所示。

	Curves	Attributes
General	Options	Sensors/LSC
Tra	nsform into sub	system
Path C:\User	s\Public\Docum	ents\UM Software
Object identif	ier	
UMObject		
Comments		
connerta		
Train 3D		
Generation of	equations	
 Symbolic Numeric-it 	erative	
• Numerie to	the second	
Gravity force	direction	U
CA.		U
ey:		
ez: -1		L
Characteristic s	ize: 1.00	•/
	1.00	
Scene image:	Suppo	rt 🔽
	Suppo	n
		团10、生物
		图 1.0 此件
$\langle \langle \rangle$	>>	图 1.0 匹拜
$\langle \langle $	>>	图 1.0 处井

图 1.8 选择场景几何图形





1.3.3.2 单摆的几何图形

单摆的几何图形由两个图形元素组成: Ellipsoid 和 Cone。

- 1. 选中左侧模型树的 Image。
- 2. 点击交互界面第一行的加号按钮,创建第二个几何图形。
- 3. 重命名为 Pendulum。

备注:每当修改文本或数值时,务必敲击回车确认。

- 4. 点击交互界面第二行的加号按钮,创建一个图形元素,选择椭球体类型 Ellipsoid,设置参数 a = 0.05; b = 0.2; c = 0.2,并设置颜色为蓝色。
- 点击交互界面第二行的加号按钮,添加第二个图形元素,选择圆锥体 类型 Cone,设置参数 R2 = 0.03; R1 = 0.03; h = 1,并设置颜色为蓝 色。



至此,我们完成了单摆几何图形的建模工作。





1.3.4 创建刚体

本例的单摆模型有且仅有一个刚体。

- 1. 选中左侧模型树的 Bodies。
- 2. 点击交互界面的加号按钮,创建一个刚体,如图 1.9 所示。



图 1.9 添加一个刚体

- 3. 重命名为 Pendulum (支持中文命名)。
- 4. 从交互界面中部 Image 处下拉菜单选择 Pendulum 几何图形。
- 5. 设置质量参数 Mass = 1 (kg), 如图 1.10 所示。

Name:	Pendulum	+ +	R 🗗	Î
Comm	ents/Text at	tribute C		
Orien	ted points	Vectors	3D Con	tact
Para	ameters	Position	Poir	nts
Coordi	nates (PP):	Quaternior	n	-
Go to e	element			¢,
Image	:	Vis	sible	
Pendu	lum			-
Con Inertia	pute autom a parameter:	atically s		
Mass:	1			C
Inertia	a tensor:			
	C	C		С
		С		С
				C
Added	mass matrix	c ((none)	
Coord	inates of ce	nter of mass		
	С	С		С

图 1.10 定义刚体参数





1.3.5 创建铰

下面我们用一个转动铰(Rotational Joint)将单摆刚体(Pendulum)和大地(Base0)建立联系。

- 1. 选中左侧模型树的 Bodies | Pendulum。
- 2. 在右侧交互界面单击手型按钮12,并依次选择 Create joint |

Rotational, 如图 1.11 所示。

<	Rotational	¢	Create joint	
4	Translational	4	Image	XX
	6 d.o.f.			
23	General	Ĺ		
3	Quaternion		C	

图 1.11 创建转动铰

经过如上操作,自动创建了一个名为jPendulum(支持中文命名)的转动 铰。Joint points 和 Joint vectors 分别用于描述两个物体的相对位置以及转动轴 方向,其坐标值为各自连体坐标系中的局部坐标。

3. 在 Joint points 参数框定义 Pendulum 的 Z 坐标为 1,使单摆的上端点 与 Base0 的原点重合,转动轴保持缺省的 X 轴,如图 1.12 所示。



图 1.12 设置转动铰参数

Universal Mechanism 9





1.3.6 保存模型

至此,单摆模型完成所有建模工作,我们需要将其保存,并把模型命名为 Pendulum (支持中文命名)。

- 1. 选择菜单 File | Save as...。
- 2. 设置保存路径为<u>{UM Data}\My models\Pendulum</u>(可自定义路径), 然后点击 Save 和是(Y),如图 1.13 所示。

Save as	×			
Path (including object	t name):			
C: \Users \Public \Doc	uments\UM Software Lab' 🙈 🗸 C:\Users\Public\Documents\U Save	M Software Lab\Univ	ersal Mechanisr	n\9\My models\Pendulum
			X	
Confirm	ation Create new directory C:\Users\Pub Lab\Universal Mechanism\9\My m	lic\Documents\U nodels\Pendulum	M Software ?	×
	[是(Y)	否(N)	

图 1.13 保存模型

备注: {UM Data}为 UM 的数据目录,缺省为 "C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\9"。每个 UM 模型对应一个文件夹,模型名称 Pendulum 即为文件夹名称。

1.3.7 运行 UM Simulation 程序

现在,我们的单摆模型可以进行仿真计算。

1. 在 UM Input 程序界面,选择主菜单 Object | Simulation,运行 UM Simulation 程序,并自动加载当前的单摆模型。

备注: 当 UM Simulation 仿真程序运行时,最好将 UM Input 程序关闭,以免两 个程序同时访问同一个模型而造成数据混乱。





1.4 仿真

现在,我们已经进入了 UM Simulation 仿真程序界面,我们将打开一些动画 窗口,并把单摆从竖直位置转动1 弧度,作为初始条件,然后开始仿真计算。

打开动画窗口

选择菜单 Tools | Animation window,即可打开一个动画窗口(这一步可以不用做,因为 UM Simulation 加载模型时已经自动打开了以动画窗口)。请熟悉动画窗口的基本操作,调整视图后,动画窗口显示如图 1.14。

转动操作 (工具栏图标):选中该图标,将鼠标光标移动到动画窗口,按下 鼠标左键同时移动鼠标,即进行转动操作。

平移操作 ⁽²⁾ (工具栏图标): 选中该图标,将鼠标光标移动到动画窗口,按下鼠标左键同时移动鼠标,即进行平移操作。

缩放操作 (工具栏图标):选中该图标,将鼠标光标移动到动画窗口,按下 鼠标左键同时移动鼠标,即进行缩放操作。



图 1.14 动画窗口显示的单摆模型

备注: UM Simulation 程序采用了全新的图形引擎 ORGE, 其动画窗口操作与 UM Input 程序略有不同, 使用时推荐将平移图标始终保持为选中状态,则按下鼠标 左键移动为平动, 按下鼠标中键移动为转动, 滑动鼠标滚轮为缩放。





开始仿真

1. 选择菜单 Analysis | Simulation, 弹出 Object simulation inspector 仿真 控制界面,如图 1.15 所示。

Object	simulation inspec	tor					
Solver	Initial conditions	Object variables XVA Information					
S	olver options	Type of coordinates for bodies					
	Simulat	tion process parameters					
Solve	r	Type of solution					
 BI AI Pa 	DF BM ark method	Null space method (NSM)					
© Ge © RI © Pa	ear 2 K4 ark Parallel	Range space method (RSM)					
Time ··· > 10 III							
Error t	olerance ay to real time simu	IE-6					
Int	tegration	Message Close					

图 1.15 仿真控制界面

初始条件

为了使单摆发生运动,我们需要把它先偏离一定角度。这里我们有专门的"初始条件"工具可以进行定义。

1. 在 Object simulation inspector 仿真控制界面选择 Initial conditions | Coordinates。

这里用于显示模型所有的铰坐标,对于单摆模型,有且仅有一个铰坐标。

2. 设置初始坐标 Coordinate 为1,然后回车,这样单摆初始就有了偏离,如图 1.16 所示。

备注: UM 软件采用国际单位制 (SI), 故此处 Coordinate 角度单位为弧度。





Animation window	6	Dbject simul	ation	inspector			
👜 🗟 🔄 🖑 🚸 🐢 🖓 🔹 🔀 🗑 🗑 🔰 🔽		Solver	Ini	tial condition	is Ob	ject variables	XVA Information
		Coordinates	Cons	traints on in	itial conditio	ns	
		🖻 🗎	•	ΘΘ	x=0 1	/=0 <u>\$</u>	
		Ť	~	Coordinate		Velocity	Comment
		1.1		1		0	jPendulum 1a
/							
/		<					>
/		Message Number of d.c	dx:	= 0.1 1	da=	0.1 🛄	
/		Integ	ration	-	P	/lessage	Close

图 1.16 定义初始单摆的初始条件





仿真计算

现在你的模型可以进行仿真计算,不妨直接算10秒工况试试。

1. 在 **Object simulation inspector** 仿真控制界面点击 **Integration** 按钮。

仿真开始, Process parameters 窗口会出现在屏幕右下角,显示当前计算进度,如图 1.17 所示。

Process parameters	X
Simulation time (s)	8.46
Duration time (s)	1.11
Step duration (s)	1.5002E-5
✓ Step size (s)	0.02
Pause	Ш 🕨
85%	

图 1.17 仿真进度

当仿真结束时, Pause 窗口会弹出, 如图 1.18 所示。此时, 用户可以进行延 长仿真时间和修改积分方法等操作。

Pause				
Process parameters	Solver stat	istics		
Simulation process p	arameters	Solver options	Type of coordinates f	for bodies
Solver BDF ABM Park method Gear 2 RK4 Park Parallel Time Step size for animatic Error tolerance Delay to real time	on and data	be of solution Null space meth Range space me > • • storage 0.02 1E-6	od (NSM) ethod (RSM)	
Continue	M	essage	Save	Interrupt

图 1.18 暂停窗口

2. 在 Pause 窗口点击 Interrupt 按钮,又回到了 Object simulation inspector 仿真控制界面,此时模型又回到设定的初始状态。





绘制曲线

在仿真进行的同时用户可以观察不同变量的时程曲线。诸如位移、速度、加速度和力等。这里,我们举例演示:定义并观察单摆刚体质心横坐标的变化。

首先,打开一个绘图窗口。

1. 选择菜单 Tools | Graphic window。

然后,打开变量向导。

2. 选择菜单 Tools | Wizard of variables。

Wizard of variables 是专门用于创建各种变量的工具,这些变量既可以是标量,也可以是矢量和轨迹,分别在绘图窗口和动画窗口显示,如图 1.19 所示。

🔄 Wizard of variables						×
a+b Expression User va	riables	🕪 Reactions	Coordinates	🕑 Solver vari	iables 🛛 📑 Al	forces
🥩 Variables for group of bo	odies	🙎 Joint forces	a 🦾 Angul	ar variables	💒 Linear varia	ables
🖃 🗹 pendulum	Select	ed				
Pendulum	Pendu	lum				
	Coord	dinates of point in th	e body-fixed frame of r	eference		
			0	0		0
	Type					
	00	oordinate		O Bipolar vector		
	0.0	locity		O Bipolar velocity		
		celeration		O Bipolar accelerat	tion	
	Comp	onent				
	Ox	() Y	⊖z	\bigcirc	Οv	
	Reso	ved in SC of body				
	Base)				-
	Relat	ive to body				
	Base)				_
			0	0		
			0			0
ruv(Pendulum)	Coordinate	of point (0, 0, 0) of	hody Depdulum relative	to Bacell, SC Bacell	projection V	
		s of point (0,0,0) of	body Pendulum relative	to based, SC based	, projection t	<u>P</u>
r:y(Pendulum)						

图 1.19 变量向导窗口

下面,我们来绘制单摆刚体质心横坐标的时程图。

- 先在 Wizard of variables 变量向导窗口选择 Linear variables (刚体的 位移、速度和加速度)。
- 2. 接着在 **Component** 参数框选择 Y 分量。
- 3. 然后点击右下角的手形按钮¹,这样就创建了变量 r:y(Pendulum), 并暂存于下方的变量框。

Universal Mechanism 9





- 4. 选中变量框中的变量 **r:y(Pendulum)**,并将其拖入我们之前创建的绘图 窗口。
- 5. 在 Object simulation inspector 仿真控制界面点击 Integration 按钮开始 仿真,可以看到绘图窗口中显示了变量 r:y(Pendulum)的时程曲线,如 图 1.20 所示。





动态矢量和轨迹

在仿真进行的同时用户还可以在动画窗口观察动态的矢量。这里我们演示如何显示单摆刚体质心的速度矢量。首先,我们需要在 Wizard of variables 变量向导型创建相应的矢量变量。如果在之前的操作中不慎将变量向导窗口关闭,请不必担心,通过菜单 Tools | Wizard of variables 重新打开即可。

- 1. 先在 Wizard of variables 变量向导窗口选择 Linear variables。
- 接着在 Type 参数框选择 Velocity 速度变量(缺省为位移变量 Coordinate)。
- 3. 然后在 **Component** 参数框选择 V 分量 (表示矢量 Vector)。
- 4. 再点击右下角的手形按钮 (注:亦可点击 ,省略下一步操作),

创建速度变量 v:v(Pendulum),并暂存于下方的变量框。

5. 选中变量框中的变量 v:v(Pendulum),并将其拖入一个已有的动画窗口。





备注: 在动画窗口中的矢量变量列表缺省为隐藏状态, 读者可以在动画窗口选择 右键菜单让其显示在所需位置。

 将光标移动到动画窗口,点右键,选择 Position of vectors list | Bottom。

下面,我们再定义一个单摆刚体质心的轨迹变量。

- 重复以上几步操作(注: 第二步中 Type 选择 Coordinate),定义轨迹 变量 r:v(Pendulum)并拖入动画窗口。
- 8. 在动画窗口底部**矢量列表区**分别双击**速度变量**和**轨迹变量**,将缺省颜 色分别修改为**红色**和**蓝色**。
- 9. 在 **Object simulation inspector** 仿真控制界面点击 **Integration** 按钮开始 仿真。

这时,可以看到在动画窗口实时显示了单摆质心的速度矢量和运动轨迹,如 图 1.21 所示。如果需要,可以通过右键菜单 Vectors settings 修改各种矢量的比 例尺。

双击某个矢量,可以修改其颜色。对于轨迹变量,还可以修改显示的点数。



图 1.21 动态显示单摆质心速度矢量和运动轨迹

Universal Mechanism 9





2. 自由振动与受迫振动

2.1 课程内容

本课程演示如何在 UM 模型里定义力,如何用时间函数驱动刚体的运动,以 及模型参数化的方法。我们将使用 Linear analysis 线性分析工具计算系统的平衡 位置,获得其固有频率和振型。此外,我们还会用到 Statistics 统计工具分析变 量结果的功率谱。

2.2 模型简介

我们考虑一个简单振动系统的自由振动和受迫振动两种工况。在本课程中, 我们将建立如图 2.1 所示的模型。该模型由两个刚体 Top 和 Brick、两个平动铰、 一个线性弹簧和一个线性阻尼器组成。其中, 刚体 Top 的运动是时间函数(正弦 函数)驱动的。

读者可以在本地路径{UM Data}\SAMPLES\TUTORIAL\oscillator 找到这个模型²。



图 2.1 模型简图

² 读者也可以从官方网站下载模型 <u>http://www.umlab.ru/download/90/oscillator.zip</u> Universal Mechanism 9 19





2.3 建模

2.3.1 运行 UM Input 程序和新建模型

运行 UM Input 程序

依次单击 开始 | 所有程序 | Universal Mechanism 9 x64 | UM Input。
 或:双击桌面快捷方式 UM Input。

新建一个模型

2. 选择菜单 File | New object, 新建一个 UM 模型。

或:点击工具栏图标□。





2.3.2 创建几何图形

Тор

这里我们来创建一个矩形薄板作为刚体 Top 的几何图形。

- 1. 先选中**模型树**里的 Images,然后点击**交互界面**的加号按钮 ⁺,新建 一个几何图形 (GO)。
- 2. 重命名为 Top。
- 3. 添加一个图形元素 (GE),选择类型 Box。
- 设置 Box 的尺寸(Parameters)和位置(GE Position)参数,如图 2.2 所示。
- 5. 设置颜色为蓝色。

					Name:	Тор		Þ	+	Ð	Û
	- 4		Þ.		Comm	nents/Te	xt attril	oute C			
Name	: Top										
Com	ments/Text attribute (0		ļ	Descri	ption	GO posi	tion			
					Trans	slation					
Descr	iption GO position				x:						C
Box					у:						С
1 Dox		_			z: -(0.005					С
Туре	e: 🥑 Box 👻	+ 🕩	Î		Rotat	tion					=
Cor	mments/Text attribute	e C				•	0				C
						•	0				С
	GE position	Material				•	0				C
	Parameters	Colors			Shift	after rot	tation				_
A:	0.2		C		x:						С
В:	0.2		С		у:						C
C:	0.01		С		z:						C

图 2.2 创建 Top 的几何图形





Brick

现在我们来创建一个边长为 0.2m 的正方体作为刚体 Brick 的几何图形。

- 1. 添加一个几何图形 (GO)。
- 2. 重命名为 Brick。
- 3. 添加一个图形元素 (GE),选择类型 Box。
- 4. 设置 **Box** 的尺寸 (Parameters) 和位置 (GE Position) 参数, 如图 2.3 所示。
- 5. 设置颜色为红色。

		Name:	Brick	ំ 🕂 🗐 ដែ
		Comme	ents/Text attribute	c
		Descrip Box Type: Comm	tion GO position	+ [+ (∰
Name: Brick Comments/Text at	🖋 🕂 💽		Parameters GE position	Colors Material
		Tran	slation	10
Description GO p	osition	x:		
Box		y:		
Turner	 _ 🕞	en 2: -	0.1	
Box		Rota	tion	0
Comments/Text	attribute C			0
			- 0	
GE position	Material		• •	
	Colors	snift x:	arter rotation	0
A: 0.2				0
B: 0.2		<u> </u>		

图 2.3 创建 Brick 的几何图形





Spring

现在我们来创建一个螺旋弹簧的几何图形。

- 1. 添加一个几何图形 (GO)。
- 2. 重命名为 Spring。
- 3. 添加一个图形元素(GE),选择类型 Spring。
- 4. 设置 Spring 的尺寸(Parameters)参数,如图 2.4 所示。
- 5. 设置颜色为红色。

	Comments/Text attribute	e C		
ſ	Description GO position]	—,~	
	Spring			
	Type: 💈 Spring 👻	+ F		
	Comments/Text attribu	te C		
	GE position	Material		
	Parameters	Colors		
	© Left (Right		
	Radius:	0.07	C	
	Height:	1	C	
	Bar diameter (d):	0.02	C	
	Number of coils:	5	1	
	Number of coils: Coil discretization:	5 20	24	



Damper

它了Tongsuan 同算

最后我们来创建阻尼器的几何图形 Damper,如图 2.5 所示。

- 1. 添加一个几何图形 (GO)。
- 2. 重命名为 Damper。
- 3. 添加第一个图形元素(GE),选择类型 Cone。
- 4. 设置 **Cone** 的参数如下:

$$R2 = 0.02;$$

 $R1 = 0.02;$
 $H = 1_{\circ}$

5. 设置颜色为蓝色。

6. 添加第二个图形元素 (GE), 选择类型 Cone, 并设置参数如下:

R2 = 0.04;R1 = 0.04;

$$H = 0.5$$

设置位置参数(GE position), **Translation** | **Z** = 0.25,设置颜色为**红** 色。







2.3.3 创建刚体

Тор

我们来创建第一个刚体 Top。

- 1. 添加一个刚体。
- 2. 重命名为 Top。
- 3. 从 Image 下拉菜单中选择 Top, 如图 2.6 所示。
- 4. 保持质量(Mass)和惯性张量(Inertia tensor)参数为空。

		т			
Comm	ents/Text at	tribute C			
Orien	ted points	Vectors	3D Co	ntact	
Para	ameters	Position	Po	ints	
Coord	nates (PP):	Quaternic	on		
Go to	element			ţ,	
Image	:	V	isible		
Тор				-	
Тор					
Brick					
Damp	er				
Inerti	a tensor:				
	C	C		С	
		C		C	
				<u> </u>	
Addeo	l mass matrix	G	(none)		
Coord	inates of cer	nter of mass			
		0			

图 2.6 创建刚体 Top





Brick

现在我们来创建第二个刚体 Brick。可以用参数符号(identifier)来定义它的 质量。参数化建模的优势在于我们可以很方便地在仿真程序界面修改数值,不必 回到建模程序界面去修改。如果选用符号法(缺省是数值迭代)生成运动方程, 参数化建模还能省去修改模型后重新生成运动方程的工作。

- 1. 添加一个刚体。
- 2. 重命名为 Brick。
- 3. 从 Image 下拉菜单中选择 Brick。
- 4. 设置质量(Mass)为m,回车,弹出初始赋值(Initialization of value)窗口。
- 5. 设置参数值(Value)为10,并回车确认。
- 6. 此时,这个新的参数符号 m 就添加到左下方的参数表,如图 2.7 所示。

Identifier	Value	Comment	Comments/Text at	ribute C
m	10			
			Oriented points	Vectors 3D Contact
			Parameters	Position Points
			Coordinates (PP):	Quaternion ~
Accept	I dd to the sheet	Whole is	Go to element	jî;
Ассерс	Add to the sheet:	whole is	Image:	✓ Visible
			No	`
. 🖪 🗌		n, ježn, jezn, je	Compute automa	tically
			-Inertia parameters	1.
ole list	•	1	Mass: m	L
me	Expression	Value	Inertia tensor:	
	10			
			Added mass matrix	(none)
			-Coordinates of cer	ter of mass





2.3.4 创建铰

刚体 Top 的铰

刚体 Top 沿着垂向做正弦运动,驱动函数为Asin(ωt)。下面我们来定义刚体 Top 相对大地 Base0 的平动铰。

- 1. 先选中左侧模型树里的刚体 Top。
- 2. 然后在右侧交互界面单击按钮 ,并依次选择 Create joint |

Translational,如图 2.8 (左)所示。这样就创建了刚体 Top 相对大地 Base0 的平动铰。

3. 在 Geometry 页面设置平动铰的参数,如图 2.8(右)所示,初始将刚体 Top 的原点置于 Base0的(0,0,0.5)处,Top 和 Base0的 Z 轴相互平行,Top 相对 Base0可在 Z 轴方向运动,而其他方向为理想约束状态。

- N	Name: Top	+		•	· 💽			7		
l c	Comments/Text attrib	oute C								
	Oriented points	Vecto	rs 🔅	3D Contact		Name: iTop		+ F	僃	\bigtriangledown
	Parameters	Positi	on	Points				• •	3	
	Coordinates (PP):	Quate	rnion	•	1	Body1:		Body2:		
	Ca ta alamant	_		_	<u> </u>	Base0		■ Top		-
۲	Rotational	÷	Creat	e joint		Type: 🛃 Tr	anslatio	nal		•
4	Translational	1	Image			Geometry [Descript	ion		
7	6 d.o.f.	B	Bipola	ar forces	•	-Joint points				
23	General	<u> </u>			1	Base0			<mark>۲</mark> ۵	5
9	Quaternion	F		С			C	0	.5	C
Τ	Inertia tensor:					Тор			<mark>۳</mark> ۵	3
	C		C	С			C	C		С
			C	C		Joint vector	s			=
				C		Receil		axis 7 : (0.0	1)	-
						Daseu	n o	uno 2 1 (0)0,	-)	n
	Added mass matrix:		(no	ne) 😶				1		
	Coordinates of cente	r of m	ass		51	Тор		axis Z : (0,0,	,1)	•
	C		C	C		0	<u>n</u> 0	<u>n</u> 1		n

图 2.8 创建平动铰





- 4. 切换到 Description 页面。
- 5. 勾选 **Prescribed function of time** 选项, 弹出提示框 replace existing element,点击"是"。
- 6. 设置函数类型(Type of description)为表达式 Expression,然后输入 a*sin(omega*t),如图 2.9 所示,并回车。

Vame: ITop		+ 🖬	龠	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
Jiop		• • •			
Body1:		Body2:			
Base0	-	Тор		•	
ype: 🛃 Tr	anslational			•	
Geometry [Description				
Configuratio	n				
Rotation:	0.00000	0000000			
Shift:	0.00000	0000000		1	
Joint coordir	nate			-1	
Prescribed	d function o	of time			
Type of des	cription				
Expression	on	🔘 File			
Function		Curve			
Time-tab	le				
	***			-	

图 2.9 定义时间函数驱动

在初始赋值(Initialization of values)窗口设置 a = 0.05 (m), omega = 10 (rad/s), 如图 2.10 所示。

	Initial	×	
	Identifier	Value	Comment
	a	0.05	
	omega	10	
	Accept	Add to the sheet:	Whole list 🗸 🗸

图 2.10 初始赋值窗口





刚体 Brick 的铰

- 1. 先选中左侧模型树里的刚体 Brick。
- 2. 然后在右侧**交互界面**单击按钮**摩**。
- 3. 依次选择 Create joint | Translational。
- 4. 在 Body1 处下拉菜单选择刚体 Top, 替换缺省的 Base0, 如图 2.11 所示。
- 5. 在 Geometry 页面设置平动铰的参数,如图 2.11 所示,初始将刚体 Brick 的原点置于 Top 的(0,0,-0.5)处,Brick 和 Top 的 Z 轴相互 平行,Brick 相对 Top 可在 Z 轴方向运动,而其他方向为理想约束状态。

Name	e: jBr	ick		+	L+	Ü	\bigtriangledown
Body	1:			Boo	dy2:		
Тор			•	Brid	k		-
Type:	4	Trans	lation	al			•
Geor	netry	Des	criptio	n Jo	int forc	e	
Join	nt point	s					
Тор						٦	6
		С			C -0.	5	С
Brick	c					ſ	6
		C					C
Joir	t vect	ors					
Тор			i	axis Z	: (0,0,1	.)	•
0		n	0		<u>n</u>		n
Brick			i	axis Z	: (0,0,1	.)	•
0		n	0		<u>n</u> 1		n

图 2.11 Brick 铰的参数





2.3.5 创建力元

现在我们来描述 Top 和 Brick 两个刚体之间的弹簧力和阻尼力。这里用符号 c 表示弹簧元件的刚度系数,符号 mu 表示阻尼元件的阻尼系数。

- 1. 先选中左侧模型树里的铰 jBrick。
- 2. 然后点击右侧交互界面的 Joint force。
- 3. 从 Type 下拉菜单中选择 Linear 线性力元。
- 分别在 Stiffness coef. (c)一栏输入符号 c, Coordinate (x0)一栏输入符号 Length, Damping coef. (d)一栏输入符号 mu,并回车,如图 2.12 所示。。参数分别赋予初值: c=250, Length=0.4, mu=5。

	Name:	jBrick		+	Ð	Û	\bigtriangledown			
	Body 1:			Body	2:					
	Тор		•	Brick			-			
	Type: 🛃 Translational 🔹									
	Geomet	ry Descrip	otion	Join	t force	2				
	💪 Line	ear					•			
	$F=F0 \cdot c^*(x \cdot x0) \cdot d^* \vee + Q^* sin(w^*t+a)$									
	Force (F	=0):		0			C			
	Stiffnes	s coef. (c):		c			C			
X 1	Coordin	ate (x0):		Leng	th		C			
	Dampin	g coef. (d):		mu			С			
	Amplitu	de (Q):		0			C			
	Frequer	ncy (w):		0			С			
	Initial pl	hase (a):		0			C			

图 2.12 定义弹簧和阻尼力元参数

备注:虽然前面在定义刚体 Brick 和 Top 的铰时,两个物体具有一定的初始距离, 但根据铰坐标的含义,在初始状态,铰坐标 x=0,故 Top 作用在 Brick 上的力为 F=-c*(x-x0)=-250*(0-0.4)=100N,Brick 所受的重力 G=m*g=10*(-9.81)=-98.1N, 也就是说在这初始条件下系统接近平衡位置。若使用 Bipolar force 进行建模,则 初始状态的 x 表示两点间的距离,请读者仔细体会二者差异。





2.3.6 弹簧和阻尼力元的可视化

至此,从力学的角度我们已经完成了模型的建模工作:刚体、铰和力元。然而,现在的模型看起来还不够完美,因为弹簧和阻尼力元并没有显示,如错误!未 找到引用源。(左)所示。为了实现弹簧和阻尼力元的可视化,我们需要创建两 个 Bipolar 力元,并设置数值为 0。这里的两个 Bipolar 力元仅用于显示弹簧和 阻尼,并不影响计算结果,如错误!未找到引用源。(右)所示。



图 2.13 力元的可视化

备注:我们其实有多种方式可以定义本例中的弹簧和阻尼力元。这里采用的是 Joint forces,但这并不是唯一的方法。我们也可以直接用 Bipolar forces,同时就 进行可视化定义,而不需要再额外定义虚拟力元。只是这种方法可能存在一个问 题,对于理想情况,当刚体 Brick 的运动幅度很大时,模型中弹簧和阻尼力元的 长度可能变为 0。这会导致 Bipolar 力元退化为 0(力元两端的连接点重合),程 序无法找到它的方向(矢量不存在)。而 Joint forces 就不会存在这个问题,因为 其方向始终沿着铰的方向。




- 1. 先选中左侧模型树的 Bipolar forces。
- 2. 然后在右侧**交互界面**添加两个 **Bipolar** 力元,并按图 2.14 所示分别设置。

	11 R		···· 🕅
Name: FictitiousSpring + 💽	Î.	Name: FictitiousDamper 🕂 🕩	Î
Comments/Text attribute C		Comments/Text attribute C	
Body1: Body2:		Body1: Body2:	
Top 🗾 Brick	-	Top Brick	-
GO: Spring	\sim	GO: Damper	~
Autodetection		Autodetection	
Attachment points		Attachment points	
К тор:		К тор:	
	С		С
Brick:		R Brick:	
C 0.1	C	C 0.1	C
Length 0.4		Length 0.4	
a+b Expression	~	a+b Expression	\sim
Description of force/moment Pascal/C expression: F=F(x,v,t)		Description of force/moment Pascal/C expression: F=F(x,v,t)	
Example: -cstiff*(x-x0)-cdiss*v+ampl*sin(om*t)		Example: -cstiff*(x-x0)-cdiss*v+ampl*sin(om*t)	
F= 0	Р	F= 0	Р

图 2.14 虚拟 Bipolar 力元





2.3.7 附加参数

UM 里的参数符号可以用来定义复杂的表达式。这里我们将添加两个新的符号来表示系统固有频率的精确解析值和临界阻尼系数。由于这个模型非常简单,所有才容易直接获得其解析解。

单自由度系统的固有频率可以由以下公式获得:

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

其中, k 是固有频率, 单位为 rad/s;

c是刚度系数,单位为 N/m;

m 是刚体质量,单位为 kg。

临界阻尼可表示为:

$$\mu^* = 2\sqrt{cm}$$

其中,μ*为临界阻尼系数,单位为 Ns/m。 现在我们来添加新的参数符号。

1. 点击左下方参数表的按钮 或在参数表区域点右键选择菜单 New identifier, 如图 2.15 所示。



图 2.15 参数符号列表

Universal Mechanism 9





在弹出窗口定义参数符号 k(固有频率)及表达式 sqrt(c/m),如图
 2.16 所示。

Name: k	
Expression: sqrt(c/m)	C
Comment: Natural frequency	
Apply Cancel	-

- 图 2.16 参数符号 k
- 以相同的方法再添加一个参数符号 mu_star (临界阻尼系数),定义表 达式 2*sqrt(c*m),如图 2.17 所示。

Add identifier	×	
Name:	mu_star]
Expression:	2*sqrt(c*m)	
Comment:	Critical damping coefficient	
	Apply Cancel	

图 2.17 参数符号 mu_star

2.3.8 准备仿真

- 1. 选择菜单 File | Save as...保存模型(请读者自定义模型路径),命名为 Oscillator。
- 2. 在 UM Input 程序界面选择菜单 Object | Simulation 或使用快捷键 Ctrl+M 运行 UM Simulation 仿真程序并自动加载当前模型,待 UM Simulation 程序运行后,最好将 UM Input 程序关闭。





2.4 仿真

让我们来做一些特殊工况的振动仿真:有阻尼的自由振动、无阻尼的自由振 动和无阻尼的受迫振动。

2.4.1 自由振动

有阻尼的自由振动

- 选择菜单 Tools | Animation window,打开一个新的动画窗口(这一步可以不用做,因为 UM Simulation 加载模型时已经自动打开了以动画窗口)。
- 2. 选择菜单 Tools | Graphic window, 打开一个新的绘图窗口。
- 3. 选择菜单 Tools | Wizard of variables, 打开变量向导。
- 4. 在变量向导的 Linear variables 页面, 左侧选中 Brick 刚体, 右侧设置 Type 为 Coordinate (缺省就是), 选择 Z 向分量 (Component), 点击 按钮 [♥] 创建一个变量,并将其拖入绘图窗口, 然后关闭变量向导。
- 5. 选择菜单 Analysis | Simulation, 弹出仿真控制界面 Object simulation inspector, 设置仿真时间为 25s。



图 2.18 仿真程序界面

- 6. 仿真程序界面的几个窗口可随意调整大小和位置,如图 2.18 所示。
- 7. 点击仿真控制界面 **Object simulation inspector** 的 **Identifier**。





8. 设置参数 a 为 0,并回车,如图 2.19 所示。这表示刚体 Top 的振幅为 0,不发生运动。

Object variables	XVA	Information	Tools
Solver	Identifiers	Initial con	ditions
st of identifiers	Identifier control		
→ 💾 🔜			
Name	Expression	Value	Comme
n	10		
a	0		
omega	10		
c	250		
ength	0.4		
mu	5		
k	sqrt(c/m)	5	Natura
mu_star	2*sqrt(c*m)	100	Critical
•			4
Integration	Messao	e d	ose





9. 点击仿真控制界面 Object simulation inspector 的 Initial conditions,定 义初始位移值为 0.1 (m),如图 2.20 所示。这表示我们将刚体 Brick 初始偏移一定距离,使之远离平衡位置,这样才能获得较大幅度的振动。

bject simulation in	spector		
Object variables	XVA	Information	Tools
Solver	Identifiers	Initial co	nditions
Coordinates Constr	aints on initial o	conditions	
🖻 🖪 🚭	$\odot \ominus$	x=0 ν=0 <u>Ϋ</u>	
ψ́ 🗸 Coo	ordinate	Velocity	C
1.1 0.1		0	jВ
•			Þ
Message dx=	0.1 📠	da= 0.1	
Integration	Messa	ge (Close

图 2.20 设置初始条件

10. 点击仿真控制界面 **Object simulation inspector** 的 **Integration** 按钮开始 仿真计算。

数值仿真将完成 25 秒的计算工况,可以在动画窗口观察刚体 Brick 的运动 情况,在绘图窗口观察刚体 Brick 竖向位移的时程曲线。





11. 在绘图窗口点右键,选择菜单 Show all,可以显示整个曲线,如图 2.21 所示;也可以将光标指向绘图窗口顶部,此时隐藏的工具栏会自



动显示,单击其中的 经按钮。

图 2.21 绘图窗口的结果

备注:双击绘图窗口左侧列表里的曲线,可修改其颜色和线型。





无阻尼的自由振动

现在我们取消阻尼(把阻尼系数设为 0),来对比无阻尼和有阻尼的计算结果。

- 1. 选中绘图窗口的变量 r:z(Brick),点右键,然后选择菜单 Copy as static variables。这样就把计算的结果复制了一次,并保留在绘图窗口。
- 2. 点击 Pause 界面的 Interrupt 按钮,回到仿真控制界面。

备注:我们从变量向导创建的并拖入绘图窗口的变量 r:z(Brick)是动态变量,它 会在每次仿真时重新计算。为了对比不同参数配置工况的仿真结果,我们需要将 动态变量进行复制操作,转换为静态变量,静态变量始终保持不变。

- 3. 选择仿真控制界面的 Identifier。
- 4. 设置参数 mu 为 0,并回车,这样就取消了阻尼。
- 5. 点击 Integration 按钮开始仿真。

大约经过数秒即完成计算。读者可以对比两次仿真的结果,如图 2.22 所 示。 Variables Image: Trac(Pick) - Co... Image: Trac(Pick) -

图 2.22 两次仿真结果对比





临界阻尼的自由振动

根据解析式得到临界阻尼系数 mu = 100 Ns/m,让我们来模拟这个工况。

- 选中绘图窗口的动态(第一个)变量 r:z(Brick),点右键,然后选择菜 单 Copy as static variables。这样就把这次计算的结果复制了一次,并 保留在绘图窗口(现在共有两个静态变量)。
- 2. 点击 Pause 界面的 Interrupt 按钮,回到仿真控制界面。
- 3. 选择仿真控制界面的 Identifier,设置参数 mu 为 100。
- 4. 点击 Integration 按钮开始仿真。



由图 2.23 可见, 刚体 Brick 的运动不再呈周期性。

图 2.23 三次仿真结果对比

- 5. 读者可以自行重复以上步骤,尝试更改不同的阻尼系数值,进行仿 真,对比分析结果(别忘了复制计算结果为静态变量)。
- 6. 最后,请将阻尼系数 mu 重置为 100 (Ns/m)。





2.4.2 统计分析

现在我们来使用其它工具进行结果分析。

- 1. 选择菜单 Tools | Statistics, 打开一个新的统计窗口。
- 2. 将绘图窗口中无阻尼自由振动对应的静态变量拖入统计窗口。
- 3. 点击统计窗口的功率谱密度 Power spectral density。

从功率谱密度的波形可以看出,这个振动过程仅有一个频率,即为系统固有频率,其精确解为5 rad/s。下面我们来分析数值解,从图 2.24 可以看出峰 值对应的频率大约为0.78Hz,转换为圆频率: 0.78*2π = 4.9 rad/s,与解析解非 常接近。

备注:为了读取更加精确的值,读者可以通过鼠标操作调整窗口显示比例,将曲 线局部放大。



图 2.24 无阻尼自由振动的功率谱密度





2.4.3 静态和线性分析

下面我们来学习静态和线性分析(Static and linear analysis)工具的用 法。使用这个工具,我们可以获得系统的平衡位置、固有频率和振型,以及阻 尼比。

首先,我们需要依次关闭 Pause 窗口和仿真控制界面。

- 1. 点击 Pause 界面的 Interrupt 按钮,回到仿真控制界面。
- 2. 点击仿真控制界面的 Close 按钮。

打开线性分析窗口

3. 选择菜单 Analysis | Static and linear analysis, 弹出静态和线性分析窗口。

平衡位置

4. 先点击 Equilibrium,再点击按钮[●]进行平衡位置计算。最后弹出消息
 "Equilibrium position is successfully computed!"此时,动画窗口显示的状态就是平衡状态。

备注:计算完成后平衡位置对应的坐标可以保存为文件。先点击 Initial conditions, 再点击 ☐ 按钮即可保存到本地。在后续仿真时,如果需要,可以将文件读入仿 真控制界面,作为初始条件。

固有频率和振型

- 5. 先点击 Frequencies/Eigenvalues,再点击按钮 [◆]进行固有频率计算。 计算得到的固有频率列表在窗口左边显示。可以看到,系统仅有一个 频率,为0.795775Hz,这个值与圆频率 5rad/s 非常接近。
- 6. 点击按钮 , 可以观察振型。读者可以自行调整幅值(Amplitude)

和速率(Rate)。点击按钮 型或按下 Esc 键可以暂停振型动画。

平衡稳定性

现在我们来计算线性化系统的根(特征值),通过它可以了解模型的稳定性。





Identifiers	Initial conditions	Options
-------------	--------------------	---------

Eigenvalues

7. 先勾选 Eigenvalues 选项,再点击 [☉]进行特征值计算。

E	igenval	ues	
٧U	lse zero	velocities	
S	kip dan	nping matrix	
Re/	Im		~
Sor	t by: fr	equency	~
	Re	Im	
1	-5	0.000251235	

计算得到的系统特征值列表显示在右侧。选择 Re/Im (实部/虚部)显示模式,对于每一组共轭根,这里只显示其中虚部为正的值。可以看出,特征值的实部为负,因此平衡位置是渐进稳定的。

阻尼比

	<u>Eigenvalues</u>		
٧Ľ	Jse zero velocities	;	
	kip damping matr	ix	
Fre	quency/Damping	ratio	~
Sor	t by: frequency		~
	f (Hz)	Beta(%)/r	
1	3.99853E-5	100.000	

9. 选择 Frequency/Damping ratio (频率/阻尼比)显示模式。可以看到, 阻尼比 Beta 为 100%,正好对应临界阻尼。理论上此时的频率应该为 0Hz,但由于数值计算误差,这里显示的是一个很小的数。

备注: 从计算得到的阻尼比数值可以看出是否每个振型对应的阻尼系数都合适, 阻尼器的位置和参数是否需要修改。

- 10. 读者可以在 Identifier 页面自行修改参数 mu 的数值,重复以上步骤, 观察系统频率和阻尼比的变化。
- 11. 关闭静态和线性分析窗口 Static and linear analysis。





2.4.4 受迫振动

下面我们来考察无阻尼的受迫振动。

- 1. 删除绘图窗口中的所有静态变量,只保留第一个动态变量。
- 2. 选择菜单 Analysis | Simulation,打开仿真控制界面。
- 3. 点击 Identifier,设置参数值: a = 0.05, omega = 8, mu=0。
- 4. 点击 Integration 开始仿真。可以看到,刚体 Top 也在运动,刚体 Brick 垂向位移的时程曲线如图 2.25 所示。



图 2.25 受迫振动 (omega = 8rad/s)





共振

最后,我们来模拟一个共振工况:当外部激励的频率与系统固有频率相等时。

- 1. 点击 Pause 窗口的 Interrupt 按钮。
- 2. 在仿真控制界面,设置参数 omega 为 5,其余参数不变。
- 3. 点击 **Integration** 开始仿真。正如我们期望的,当外部激励的频率与系统固有频率相等时,系统明显发生了共振现象,如图 2.26 所示。



图 2.26 受迫振动: 共振工况





3. 悬臂梁

3.1 课程内容

本课程演示如何使用多刚体方法建立柔性的悬臂梁模型,使用线性分析工具 求解其平衡位置、固有频率和振型,并仿真欧拉临界力和大变形两个特殊工况。

3.2 模型简介

我们将用多刚体的方法来建立一个悬臂梁模型[1]。这根梁由多段刚性杆件 首尾连接而成,相邻刚体之间用转动铰连接。其中,位于两端的杆长度为*l*/2,中 间杆长度为*l*,*l=L/(N-1)*,*L*为梁的总长,*N*为刚性杆的数目。左端的刚性杆与墙 面固结,相邻两个杆定义转动自由度,并设置一个弹簧-阻尼力元,其刚度系数为 *c*,阻尼系数为α,如图 3.1 所示。



图 3.1 多段刚性杆组成的弹性梁模型

在本例中,我们用钢的材料参数来定义这根梁 ($E = 2.1 \times 10^{11} Pa$, $\rho = 7850 kg/m^3$),其横截面为圆形,总长度 L = 3 m。悬臂梁总共由 11 段刚性杆组成,读者可以在本地路径 {UM Data}\SAMPLES\TUTORIAL\cantilever_beam 找到 这个模型³。

Universal Mechanism 9

³ 读者也可以从官方网站下载模型 <u>www.umlab.ru/download/90/cantilever_beam.zip</u>





3.3 建模

运行 UM Input 程序,新建一个模型,在参数表添加参数符号: BeamLength, YoungsModulus, l, d, J, cax, dax, 如表 3.1 所示。

参数符号	表达式	备注		
BeamLength	3	梁的总长		
YoungsModulus	2.1E+11	杨氏模量		
1	BeamLength/10	中间杆长		
d	2*1/75	横截面直径		
J	pi*d*d*d/64	圆形截面惯性矩		
cax	YoungsModulus*J/l	刚度系数		
dax	5	阻尼系数		

表 3.1 梁模型参数

3.3.1 创建几何图形

模型需要4个几何图形:一个用于墙体,三个用于区分不同的刚性杆。 Support

- 1. 添加一个几何图形,选择 Box 类型。
- 2. 重命名为 Support,设置参数如下:

$$B = 0.05;$$

$$C = 0.5$$

- 3. 在 GE Position 页面设置移动距离: Translation | Y 为-0.025, Translation | Z 为-0.25。
- 4. 在 Colors 页面设置颜色为标色。

Rods

- 1. 添加一个几何图形,选择 Cone 类型。
- 2. 重命名为 Rod1,设置参数如下:

$$R2 = d/2;$$

$$R1 = d/2;$$

$$\mathbf{h}=\mathbf{l}/2\,\mathbf{\circ}$$

在 GE Position 页面设置移动距离: Translation | Y 为-l/4,转动角度: Rotational | X 为-90,如图 3.2 所示。

Universal Mechanism 9

Getting Started





- 4. 在 Material 页面设置材料密度 Density 为 7850。
- 5. 在 Colors 页面设置颜色为蓝色。
- 6. 再添加一个几何图形,选择 Cone 类型。重命名为 Rod2,设置参数如下:

$$R2= d/2;$$

 $R1 = d/2;$

 $\mathbf{h} = \mathbf{l}_{\circ}$

- 7. 在 GE Position 页面设置移动距离: Translation | Y 为-l/2,转动角度: Rotational | X 为-90,如所示。
- 8. 在 Material 页面设置材料密度 Density 为 7850。
- 9. 在 Colors 页面设置颜色为黄色。
- 10. 将几何图形 Rod2 复制一次,重命名为 Rod3,修改颜色为蓝色。

Name: Rod1 8 + +	Î						
Description GO position							
Cone							
Type: 🛕 Cone 🗸 🕂 💽	Î						
Comments/Text attribute C							
Parameters Colors							
GE position Material							
Translation							
x:	C						
y: -1/4	С						
z:	C						
Rotation	_						
x ~ -90	С						
~	С						
~	С						

图 3.2 设置 Rod1 的位置和方向





3.3.2 创建刚体

Support

- 1. 添加一个刚体。
- 2. 重命名为 Support。
- 3. 从 Image 下拉菜单选择 Support 几何图形赋给刚体。
- 4. 勾选 Compute automatically 选项,程序会根据几何图形和材料密度自动计算出刚体的质量和惯量参数,如图 3.3 所示。

Name: Support	+ +	. 🖬 🗊	Хл	
Comments/Text att	ribute C	-	r Z N	
Oriented points Parameters	Vectors Position	3D Contact Points		
Coordinates (PP):	Quaternion	~		
Go to element		T		
Image:	🗹 Visib	le		
Support		~		
Compute automa	atically			
Inertia parameters				
Mass: 97.5		C		
Inertia tensor:				
2.0515625 C	C	C		
4.0	625 C	C		
	2	.0515625 🗅		
Added mass matrix	: (r	ione) 🛄		
Coordinates of cen	ter of mass	C		

图 3.3 自动计算质量和惯量

Rods

- 1. 添加 11 个刚体。
- 2. 分别命名为 Body1, Body2, ..., Body11。
- 其中 Body1 和 Body11 选择几何图形 Rod1, Body2、Body4、Body6、 Body8 和 Body10 选择几何图形 Rod2,其余刚体选择几何图形 Rod3。
- 4. 对每一个刚体,都要勾选 Compute automatically 选项,如图 3.3 所示。

Universal Mechanism 9





3.3.3 创建铰

刚体 Support 的铰

Support 是一个固定的物体,没有自由度。我们可以建一个铰,使之与大地 (Base0)固结在一起。

- 1. 先在左侧模型树选中 Bodies | Support。
- 2. 然后点击右侧交互界面手形按钮,选择 Create joint。
- 3. 再在列表中选择 6 d.o.f., 这样就创建了一个六自由度铰。
- 4. 铰连接的第一物体为 Base0,第二物体为 Support。缺省状态,六个方向(三个平动和三个转动)的运动都是自由的。
- 5. 在 Coordinates 页面取消所有自由度,让 Support 与大地固结,如图 3.4 所示。

Name: jS	Support 🕂 🕩 🗑	\bigtriangledown
Body1:	Body2:	
Base0	✓ Support	-
Type: 🦄	6 d.o.f.	~
Geometry	Coordinates	
Translatio degrees (onal of freedom:	
🗆 X	0.00000000000	1
🗆 Y	0.00000000000	1
🗌 Z	0.00000000000	1
Rotationa	al	
degrees	of freedom:	
Orientatio	on angles	_
3,1,2		\sim
1	0.00000000000	1
2	0.0000000000	1
3	0.00000000000	1
	Name: jS Body 1: Base0 Type: S Geometry Translatic degrees 0 X Y Z Rotationa degrees 0 Orientatii 3,1,2 1 2 3 3	Name: jSupport Image: Coordinates Base0 Image: Support Type: 6 d.o.f. Geometry Coordinates Translational degrees of freedom: Image: X 0.00000000000 Y 0.000000000000 X 0.00000000000 X 0.00000000000 Image: X 0.00000000000 Image: X 0.0000000000000 Image: X 0.000000000000 Image: X 0.00000000000000000000000000000000000

图 3.4 Support 的铰





第一个 Rod 与刚体 Support 的铰

我们先来创建梁左端的铰,需要保证其边界条件为固支。

- 1. 先在左侧模型树选中 Bodies | Body1。
- 2. 然后点击右侧交互界面手形按钮,创建一个六自由度较。
- 3. 重命名为 jSupportBody1。
- 4. 选择刚体 Support 作为六自由度铰连接的第一物体。
- 5. 在 Geometry 页面设置 Body2 的连接点 Y 坐标为-l/4。
- 6. 在 Coordinates 页面取消所有自由度,使得 Rod1 与 Support 刚性连接。

Rod 之间的铰

下面定义刚性杆之间具有弹簧阻尼力元的转动铰。

- 1. 先在左侧模型树选中 Bodies | Body2。
- 2. 然后点击右侧交互界面手形按钮, 创建一个转动铰。
- 3. 重命名为 jBody1Body2。
- 4. 选择刚体 Body1 为转动铰连接的第一物体。
- 5. 分别定义 Body1 和 Body2 的连接点坐标(各自局部坐标系),如图 3.5 所示。











6. 在 Joint force 页面选择 Linear 类型力元,分别设置刚度系数 cax 和阻 尼系数 dax,如图 3.6 所示。

Name: jBody1Body:	+ 🕩] ▽	
Body 1:	Body2:		
Body1 💌	Body2	_	
Type: < Rotational		~	
Geometry Description	Joint force		
🔽 Linear		\sim	
T=T0-c*(x-x0) - d*	v + Q *sin(w *t-	+a)	X
Moment (T0)	0	C	
Stiffness coef. (c):	cax	C	
Coordinate (x0):	0	C	
Damping coef. (d):	dax	C	
Amplitude (Q):	0	C	
Frequency (w):	0	C	
Initial phase (a):	0	C	

图 3.6 设置弹簧阻尼力元

7. 以同样的方法,分别创建从 Body3 到 Body11 相邻两个刚体之间的较 及力元(注意连接点坐标)。





3.3.4 准备仿真

在进入仿真之前,我们来检查一下模型有无逻辑错误。在模型树里选中 Summary(快捷键 Ctrl+Alt+P)。如果交互界面显示"Errors not found",说明 没有逻辑上的问题,如图 3.7 所示。如果模型存在逻辑错误,则是不能进行仿真 的,点击交互界面显示的错误信息,可以自动跳转到存在错误的元素页面。

保存模型,命名为 Cantilever_beam。选择菜单 Object | Simulation (快捷键 Ctrl+M),打开 UM Simulation 仿真程序,并自动加载当前模型。







3.4 仿真

我们将进行如下仿真:计算平衡位置、固有频率、模态振型和欧拉临界力。

3.4.1 计算平衡位置

一般来说,在 UM 里创建的模型,初始状态并不在平衡位置。为了避免在仿 真开始的一段时间内出现明显的瞬态波动,有必要先计算出平衡位置并从平衡状 态开始仿真。通常这是进行仿真的第一步。计算平衡位置有如下两种方法:

- 解析法: 直接求解平衡方程;
- 数值法:对运动方程进行时域积分,逐步逼近平衡位置。

第一种方法通常比较快速且能获得更精确的解,不仅能获得系统的平衡位置 而且能找到其中不稳定的平衡位置。第二种方法,只能逐步逼近平衡位置。下面, 我们来演示两种方法。

3.4.1.1 解析法直接求解平衡方程

- 点击 按钮或选择菜单 Analysis | Static and linear analysis, 打开线 性分析工具。
- 2. 点击 Options | General option, 在 Equilibrium computation type 框设 置 Solving equations, 如图 3.8 所示。
- 3. 先点击 Equilibrium,再点击按钮 开始计算。计算完毕,动画窗口显示的即为平衡位置状态,如图 3.9 所示。



图 3.8 选择计算平衡未知的方法



图 3.9 悬臂梁的平衡位置状态

3.4.1.2 运动方程数值积分求解

- 1. 先点击 Initial conditions, 点击按钮 x=0, 将所有坐标恢复为 0。
- 2. 点击 Options | General options,在 Equilibrium computation type 框设置 Integration of equation of motion,如图 3.8 所示。
- 3. 先点击 Equilibrium,再点击按钮 ↔ 开始计算。观察动画窗口运动过程。

采用运动方程积分法求解平衡位置时,一般用系统总动能作为达到平衡位置 的判据。在一段时间内系统总动能呈下降趋势,并小于给定的数值时,认为系统 就达到了平衡。

使用这种方法计算平衡位置时,程序会自动添加附加阻尼力以加快收敛过程。 广义阻尼力与质量矩阵和速度列向量的积成正比。

$$Q_{diss} = -\alpha M(q)\dot{q} \tag{3.1}$$

阻尼系数 α 位于 Options | Parameters 页面的 Parameter of additional damping 框。分别设置不同的阻尼系数,如: 0.1、0.5 和 1。在动画窗口观察系 数变化对仿真的影响。显示了三个系数值对应的系统总动能时程曲线对比。













3.4.2 计算固有频率和振动模态

根据文献[2],悬臂梁的固有频率可以由下面的公式计算得到:

$$f_k = \lambda_k^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_0 L}} \tag{3.2}$$

其中, E 是弹性模量, 单位为 Pa;

J是横截面的惯性矩,单位为m⁴;

m₀是单位长度的质量,单位为kg/m;

L是长度,单位为m;

k 是频率序号;

λ参数定义如下:

$$\lambda_1 = 1.875, \ \lambda_2 = 4.694, \ \lambda_k = \frac{2k-1}{2}\pi \ (k > 2)$$
 (3.3)

模态振型函数可表示为:

$$\omega_k(x) = K_2(\lambda_k) K_3\left(\frac{\lambda_k x}{L}\right) - K_1(\lambda_k) K_4\left(\frac{\lambda_k x}{L}\right)$$
(3.4)

其中, K_1 , K_2 、 K_3 、 K_4 为 Krylov 函数, 定义如下:

$$\begin{cases} K_{1}(x) = \frac{1}{2}(\cosh(x) + \cos(x)) \\ K_{2}(x) = \frac{1}{2}(\sinh(x) + \sin(x)) \\ K_{3}(x) = \frac{1}{2}(\cosh(x) - \cos(x)) \\ K_{4}(x) = \frac{1}{2}(\sinh(x) - \sin(x)) \end{cases}$$
(3.5)

现在我们来计算悬臂梁的固有频率和模态振型。首先,我们按如下操作取消重力,以免梁在重力作用下发生扭曲振动。

- 1. 关闭 UM Simulation 的悬臂梁模型,运行 UM Input 打开模型。
- 2. 先在左侧模型树选中 Object。
- 3. 然后在右侧交互界面 Gravity force direction 框 ez 一栏定义重力系数 gravity_factor,赋值为 0,如图 3.11 所示。
- 4. 保存模型,再用 UM Simulation 打开。





		Generation of equation Symbolic Numeric-iterative	ons		
		Gravity force directio ex: ey: ez: gravity_factor	n	C C C	
	Initializati	ion of values		×	
	Identifier	Value	Comment		
	gravity_factor	0			
/					
\times	Accept	Add to the sheet:	Whole list	~	

图 3.11 取消重力的方法

打开**静态和线性分析工具**,点击 Frequencies/Eigenvalues,点击按钮[●]开始 计算。计算完毕,悬臂梁的各阶固有频率显示在左侧列表,如图 3.12 所示。点 击按钮 ● 或者双击某阶频率值即可观察振型动画,点击按钮 ■ 或按 Esc 键可停 止动画。

a sta	tic and li	near a	nalve	ie.		
2 36		near a	manys			
0 [•]			Ξ <i>\$</i> †		
Equilib	rium Fre	quencie	s/Eige	nvalues	Root locus	Linear vibration
✓ Free	equencie	s and n	node	5		
Meth	od of analy	/sis				
OLa	anczos Algo	orithm		0	R algorithm	
Made	a a mban	10	+	7		
Mode	es number:	10	Ż	Ŧ		
	f (Hz)					
1	0.64543					
2	4.06788					
3	11.4467					
4	22.5319					
5	37.353					
6	55.7343					
7	77.0345					
8	99.435					
9	118.634					

图 3.12 悬臂梁的固有频率





解析法和数值法计算结果对比见表 3.2。低阶模态振型如图 3.13 所示。 素 3.2 最联烈的白振频率对比

	衣 3.2 芯肖朱时日振频平利比									
k	解析解(Hz)	数值解 (Hz)	相对误差(%)							
1	0.64311	0.64543	-0.36							
2	4.03059	4.06788	-0.93							
3	11.2539	11.4467	-1.44							
4	22.1165	22.5319	-1.88							
5	36.5600	37.3530	-2.17							







3.4.3 欧拉临界力

作用在梁上的轴向力会影响其固有频率。当梁被拉伸时,固有频率增大;当 梁被压缩时,固有频率减小。当力小于临界力时保持直线稳定状态。一旦超过临 界力,将会发生横向变形(屈曲),从稳定状态变为不稳定状态。

根据文献[3],梁的临界力(欧拉公式)表示为:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E J}{(\mu L)^2} \tag{3.6}$$

J是横截面的惯性矩,单位为m⁴;

L 是长度, 单位为 m。

对比本例中的梁,其临界力为:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \times 10^{11} \cdot 2.01 \times 10^{-10}}{(2 \cdot 3)^2} = 11.58 \, N \tag{3.7}$$

下面,我们给梁的轴向施加一个压力,研究第一阶频率随压力大小变化的规律。

1. 关闭 UM Simulation 的悬臂梁模型,运行 UM Input 打开模型。

- 2. 在左侧参数表添加一个新的参数符号 Fy,并赋初值 0。
- 3. 添加一个 **T-force**,如图 3.14 所示。



图 3.14 添加 T-force





- 4. 重命名为 ForceY。
- 在 T-forces 交互界面选择 Base0 作为第一物体,选择 Body11 作为第二 物体,参考系选择 Base0。力的作用点坐标为(0, 1/4, 0),并在 Force 框设置横向力-Fy,如图 3.15 所示。
- 6. 保存模型,再用 UM Simulation 打开。

Name: ForceY	+	Ð	Î	
Comments/Text attri	bute C		_	
Body1:	Body2:			
Base0	Body11		-	X
Reference frame	Base0		-	
Reduction point : Bod	ly11			
C 1/4	C		С	
Type of description				
Expression	◯ File			
Force:				
			P	
-Fy			P	
			P	
Moment:				
			Р	
			Р	
			P	
M T = 10 dT	= 0.01			

图 3.15 设置 T-Force

打开**静态和线性分析工具**。点击 Root locus, 在 Type of problem 框选择 Frequencies, 在 Identifier 一栏选择参数符号 Fy。在 Limits 上下栏分别输入 0 和 12(稍大于临界力),在 Count 一栏输入 20,这样程序就会将 Fy 的值从 0 到 12等分为 20份,依次进行 20次计算。点击 Options | General options,在 Equilibrium computation type 框选择 Solving equations 方法计算平衡位置,如 图 3.16 所示。点击按钮 开始计算。计算完毕,点击按钮 可以绘制第一阶 频率随参数 Fy 变化的曲线,曲线与 X 轴的交点处对应着系统失稳临界状态, 如图 3.17 所示。











3.4.4 大变形

我们现在来考察一个工况:在悬臂梁的自由端作用一垂向力,自由端梁截面 将产生大的变形:垂向 w 和横向 u。文献[4]给出了这个问题的解析解。由于求解 过程比较复杂,这里就不再赘述。一些特殊工况的计算结果见表 3.3,其中 k 是 力的系数, w/L 和 u/L 是无量纲的垂向变形和横向变形。

下面我们用 UM 计算的数值解与解析解做对比。首先,在悬臂梁的自由端添加一个力使之产生大幅运动。操作如下:

- 1. 关闭 UM Simulation 的悬臂梁模型,运行 UM Input 打开模型。
- 在左侧参数表依次添加两个新的参数符号 k 和 Fz,并设置 Fz 的表达 式 k*YoungsModulus*J/(BeamLength*BeamLength),如图 3.18 所 示。
- 3. 添加一个 **T-force**, 命名为 **ForceZ**。
- 在 T-forces 交互界面选择 Base0 作为第一物体,选择 Body11 作为第二 物体,参考系选择 Base0。力的作用点坐标为(0,1/4,0),并在 Force 框设置垂向力 Fz。
- 5. 保存模型,再用 UM Simulation 打开。

$k = PL^2/EJ$	w/L	u/L
0.25	0.083	0.004
0.50	0.162	0.016
0.75	0.235	0.034
1	0.302	0.056
2	0.494	0.160
3	0.603	0.255
4	0.670	0.329
5	0.714	0.388
6	0.744	0.434
7	0.767	0.472
8	0.785	0.504
9	0.799	0.531

表 3.3 集中力作用下悬臂梁自由端的变形





Name	Expression	Value	Comment
BeamLength	3		Beam length
YoungsModulus	2.1000000E+11		Young's modulus
I	BeamLength/10	0.3	Length of rigid rod
d	2*1/75	0.008	Cross-section diameter
J	pi*d*d*d*d/64	2.0106193E-10	Moment of inertia of cross-section
cax	YoungsModulus*J/I	140.74335	Stiffness coefficient
dax	5		Damping coefficient
gravity_factor	0		
Fy	0		
k	0		Load factor
Fz	$k \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	0	

图 3.18 参数化的垂向力

现在我们来定义变量 w/L 和 u/L。

- 1. 选择菜单 Tools | Wizard of variables, 打开变量向导。
- 点击 Identifiers,从左侧列表选择参数符号 BeamLength,点击按钮
 创建一个变量。
- 3. 点击 Linear variables, 在左侧列表选择刚体 Body11, 在 Coordinates of point in the body-fixed frame of reference 一栏输入 Y 坐标 0.075,

在 Type 框选择 Coordinate,选择分量 Component Z,点击按钮 🖗 创 建变量,这表示梁端垂向的绝对位移。

- 4. 接着创建同一点的横向位移,只需将分量更改为Y,再点击按钮 [♥] 即 可创建变量。现在我们得到了三个变量: BeamLength、r:z(Body11)和 r:y(Body11)。
- 5. 点击 Expression,我们来创建 w/L 变量:
 - 先点击除法运算符 /;
 - 分别将变量 **r:z(Body11)**和 **BeamLength** 拖入除法运算符的左右两 边, 如图 3.19 所示;
 - 重命名变量为 w (缺省名为 Expression), 然后点击按钮 [●] 创建变 量。





I Wizard of variables				
🗾 Variables for group of	of bodies 🕓 T-Forces	🔍 Joint forces	🛕 Angular variables	🛃 Linear variables
a+b Expression User V	variables 🛛 😚 Reactions	📫 Coordinates 📀	Solver variables 🛛 茸 A	Il forces id Identifiers
+ / = - ×	: w:=	r:z(Body11)		BeamLength
Px Py Pz		1		
sqrt sign atan In	exp			
X sin cos abs	s pow			
if ifelse	/			
5				
W				5
BeamLength r:z(Body 11) r:v(Body 11)				
W				
	图 3.1	9 创建 w/L 变量		

- 6. 下面来创建变量 u/L:
 - 依次添加一个减法 和除法 / 运算符。
 - 别将变量 r:y(Body11)和 BeamLength 拖入如图 3.20 所示的位置;
 - 重命名变量为 u, 然后点击按钮 🖗 创建变量。





🔄 Wizard of variables					×
Variables for group of bodies	C T-Forces	🔍 Joint forces	🛆 Angular v	ariables	🛃 Linear variables
a+b Expression User variables	🕪 Reactions	Coordinates	Solver variables	📫 All for	ces id Identifiers
$+/=-\times$	w:=	r:z(Body 11)		Be	eamLength
Dy Dy Dy Lal a	dy:=	BeamLength	-	r:	y(Body11)
	u:=	dy		Be	eamLength
sart sign atan In exp					
λ sin cos abs pow					
if if elce					
7					
					<u> </u>
BeamLength r:z(Body 11)					
r:y(Body11)					
W L					
L					

图 3.20 创建 u/L 变量

下面,我们准备计算。打开**静态和线性分析工具**,点击 Equilibrium,将变量向导里的w和u两个变量拖入,如图 3.21 所示。

⊖ ⊦		_ ⊀_									
Equilibrium	Frequen	cies/Eigenvalues	Root locus	Linea	r vibrations	Ident	tifiers Initia	al condition	ns Op	tions	
Dependen	ce on para	ameter			- 8	┍≛	الختم العظم		Name	cantilever_bear	n
Identifier		k		1	o name			1 1			
Limits		0.25			Vame		Comment				1
			9 📠		N		connent				
Count		36	2	1	1						
Save co	ordinates	and identifiers									

图 3.21 变量列表

在 Identifier 一栏选择参数符号 k,设置下限为 0.25,上限为 9,离散总数为 36,对应系数 k 的增量为 0.25。点击按钮 → 开始计算。待计算完毕,打开两个 绘图窗口,分别将计算后的变量 w 和 u 拖入,如图 3.22 和图 3.23 所示。










数值解与解析解结果对比见表 3.4。

$k = PL^2/EJ$	解析解		数值解	
	w/L	u/L	w/L	u/L
0.25	0.083	0.004	0.082	0.004
0.50	0.162	0.016	0.162	0.016
0.75	0.235	0.034	0.235	0.034
1	0.302	0.056	0.301	0.056
2	0.494	0.160	0.492	0.161
3	0.603	0.255	0.601	0.254
4	0.670	0.329	0.667	0.329
5	0.714	0.388	0.711	0.387
6	0.744	0.434	0.741	0.434
7	0.767	0.472	0.764	0.472
8	0.785	0.504	0.781	0.504
9	0.799	0.531	0.795	0.531

表 3.4 数值解与解析解对比





4. 后续学习课程

恭喜读者完成了本课程三个例子的学习,相信对 UM Base 模块基本的工具和功能都有了一定了解。

《UM 软件入门系列教程》还有其它专业模块的教程:

- 《UM 软件入门系列教程 02: 批处理仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 03: 自动控制系统仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 04: 刚柔耦合动力学仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 05: 疲劳耐久性仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 06:铁道车辆动力学仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 07:列车纵向动力学仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 08: 履带车辆动力学仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 09: 公路车辆动力学仿真》
- 《UM 软件入门系列教程 10: 分布式并行计算》

此外,我们还准备了一个供读者学习的模型库:

用户手册第七章 07_UM_Simulation_Examples.pdf ⁴介绍了一些典型的模型建模方法(几何图形、铰和力元),学习这些模型有助于熟练掌握 UM 软件建模技术。本章用户手册位于<u>{UM Data}\MANUAL</u>目录,对应的模型位于<u>{UM Data}\SAMPLES\LIBRARY</u>目录。

⁴ 下载链接: <u>http://www.umlab.ru/download/90/eng/07_um_simulation_examples.pdf</u>





5. 参考文献

- [1] Slavisa Salinic, Modeling of a light elastic beam by a system of rigid bodies // Theoret. Appl. Mech. – 2004.– V.31(3-4) – P.395-410.
- [2] Euler–Bernoulli beam theory, https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory.
- [3] Euler's critical load, https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_critical_load.
- [4] James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, Mechanics of materials. Boston PWS Pub Co. 1997. 4th ed..

Universal Mechanism 9