



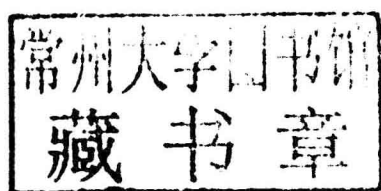
金琅学术出版社

罗 克奇

橡胶减振系统的数值预测和 案例验证

罗 克奇

橡胶减振系统的数值预测和案例验证



金琅学术出版社

Impressum / 出版事项

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u. s. w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

德意志国家图书馆出版的文献目录信息: 德意志国家图书馆在德意志国家图书目录上发布了该出版物; 详细的文献数据可在因特网<http://dnb.d-nb.de> 上获得。

该书中涉及的任何品牌名称, 产品名称受商标, 品牌和专利保护, 商标或注册商标属于各自持有人所有。作品中涉及到的品牌名, 产品名, 惯用名, 商标名, 产品描述等, 即使没有特殊注明, 也是受法律保护, 他人不能随意使用。

Coverbild / 封面图片: www.ingimage.com

Verlag / 出版社:

Golden Light Academic Publishing / 金琅学术出版社

ist ein Imprint der OmniScriptum GmbH & Co. KG /

是属于 OmniScriptum GmbH & Co. KG 的注册商标

Bahnhofstr 26, 66111 Saarbrücken, Deutschland /

德国, 萨尔布吕肯市, Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 邮编 66121

Email / 电子邮箱: info@omniscryptum.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

印刷: 见末页

ISBN / 国际标准书号: 978-3-330-82497-3

Copyright © 罗 克奇

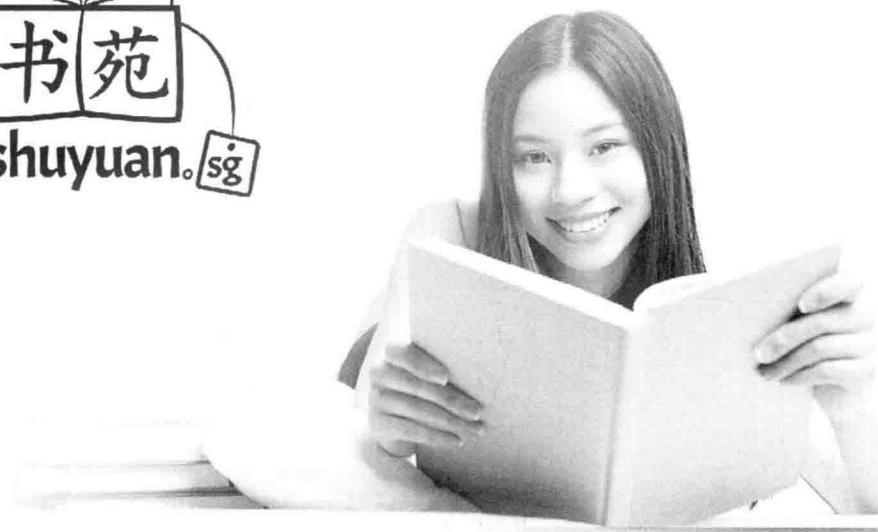
Copyright © 2017 OmniScriptum GmbH & Co. KG / 版权所有

Alle Rechte vorbehalten. / 保留所有权利

Saarbrücken 2017 / 萨尔布吕肯市 2017

罗 克奇

橡胶减振系统的数值预测和案例验证



更多好书，尽在书苑！

通过全球发展最迅速的网上书店之一，快速直接购买图书！
'按需印刷'，绿色环保！

网上购书，请选用：

www.shuyuan.sg

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.shuyuan.sg

OMNISCRPTUM MARKETING SGP PTE. LTD
10 Anson Road, #30-11
International Plaza, Singapore (079903)

info@shuyuan.sg
www.shuyuan.sg

Scriptum



Printed by
Schaltungsdienst Lange o.H.G., Berlin

橡胶减振系统的数值预测和案例验证

目录

第一章 准静态评估	1
1.1 方法	1
1.1.1 传统超弹性模形	1
1.1.2 材料参数的确定	2
1.2 工业案例验证	6
1.2.1 多向圆形减振器	6
1.2.2 偏心夹层减振器	8
1.2.3 三夹层锥向减振器	12
1.3 要点	15
第二章 疲劳评估	17
2.1 Luo应力方法	17
2.2 工业案例验证	20
2.2.1 长方形支撑减振器	20
2.2.2 锥型减振器	22
2.2.3 山形减振器	26
2.2.4 偏心夹层减振器	33
2.3 要点	36
第三章 不计残余应变的加载-卸载评估	39
3.1 不计残余应变的回弹能方法	39
3.2 工业案例验证	41
3.2.1 三夹层锥向减振器	41
3.2.2 蘑菇形减振器	45
3.2.3 长方形支撑减振器	49

3.2.4 长方形弧边支撑减振器	55
3.2.5 三夹层锥向减振器	60
3.2.6 三夹层扁状锥向减振器	61
3.2.7 哑铃形试件	65
3.3 要点	67
 第四章 考虑残余应变的加载-卸载评估	 69
4.1 考虑残余应变的回弹能方法	69
4.2 工业案例验证	71
4.2.1 V形减振器	71
4.2.2 单层圆形减振器	79
4.3 要点	86
 第五章 动力学评估	 89
5.1 自然频率域 (NFR) 方法	89
5.2 工业案例验证	91
5.2.1 方形支撑减振器	91
5.2.2 多向圆形减振器	100
5.3 要点	105
 第六章 热生成 (自我生热) 评估	 107
6.1 方法	107
6.2 工业案例验证	109
6.2.1 仪表圆形减振器	109
6.2.2 橡胶轮	118
6.3 要点	127
 第七章 蠕变和应力松弛评估	 129
7.1 含时间变量的超弹性方法	129
7.2 工业案例验证	131
7.2.1 偏心圆形减振器	131

7.2.2 含槽锥向减振器	136
7.2.3 三夹层扁状锥向减振器	142
7.2.4 哑铃形试件	144
7.2.5 七层圆形减振器	146
7.2.6 以简单试件为参考量对工业减振器的评估	150
7.3 要点	152
参考文献	154
致谢	164

准静态评估

1.1 方法

1.1.1 传统超弹性模型

准静态模拟提供了一种描述橡胶减振系统弹性特征的方法。当系统受到准静态荷载作用时其响应可用下列表达式来描述

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1-1)$$

其中 $[K]$ 为系统的刚度, $\{\delta\}$ 是位移向量, 而 $\{F\}$ 为外力荷载向量。

橡胶材料的特性可以用超弹性本构理论来表达。在工程应用中, 橡胶减振部件通常处于大变形状态。它们的表现可用超弹性模型来模拟。通常的几种基于变形能或变形能密度的超弹性模型可用于橡胶和其它弹性体。这些用于橡胶材料的超弹性模型可写成通用形式如下:

$$W = W_I(\bar{I}) + W_J(J) \quad (1-2)$$

其中 $W_I(\bar{I})$ 是材料加载响应的能量密度偏量函数, $W_J(J)$ 是应变能密度的体积能函数。 $\bar{I}$ 可进一步分成 $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$, 即第一和第二偏应变不变量, 它们的定义是

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (1-3)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2} \quad (1-4)$$

其中 $\bar{\lambda}_i$ 是偏延伸而 J 是弹性体积比。

相应的应力可写成

$$\sigma_{ij} = \frac{2}{J} \left[\frac{1}{J^{\frac{2}{3}}} + \left(\frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \right) B_{ij} - \left(\bar{I}_1 \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} + 2 \bar{I}_2 \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \right) \frac{\delta_{ij}}{3} - \frac{1}{J^{\frac{4}{3}}} \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} B_{ik} B_{kj} \right] + \frac{\partial W}{\partial J} \delta_{ij} \quad (1-5)$$

其中 B_{ij} 是 Cauchy-Green 变形张量 $\mathbf{B}$ 的左部而 δ_{ij} 是 Kronecker delta 函数的分量。

由表达式(1-2)可以导出一系列超弹性模型。多项式模型是其中之一且被广泛地用于工业界来预测在外荷载作用下橡胶部件的响应，其表达式为

$$W = W_I(\bar{I}) + W_J(J) = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (1-6)$$

其中 C_{ij} 和 D_i 是给定橡胶材料的弹性系数，可用实验来确定。

1.1.2 材料系数的确定

为获得表达式(1-6)中准确的材料系数，需要做数种不同的变形试验来获得足够的数据。这些试验包含单轴，双轴，平面和体积试验。所得到的数据须涵盖实际工程应用中的应变范围。更重要的是这些获得的材料数据必须用实际工业产品的试验加以验证。

对减振应用而言，最大的工作应变一般不超过100%。在这种情况下，式（1-6）可用较简单的 $N=1$ 来表达，成为 Mooney-Rivlin 模型

$$W = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (1-7)$$

一般而言，如果时间和设备足够，以上叙述的试验方法可以提供完整的数据组用来确定材料的弹性参数。但就表达式（1-7）来说，没有必要做一系列复杂的试验来得到材料参数。此外，在工程产品设计过程中，经常遇到所需要的数

据不够而时间要求又十分紧迫的情况。这时，可以用同一或接近的橡胶材料制成的不同产品的试验来决定弹性参数。

下面的案例说明如何用一带槽的枢轴衬套减振器来确定橡胶的弹性参数。这种类型的产品与铁路车辆的主悬挂弹簧系统有关。该案例主要的目的之一是改动原设计使其新的弹簧刚度能满足客户指定的技术要求。

一般认为，橡胶材料应当在不同的变形模态下并在包含所需的实际变形范围内进行测试。因此，这里选取三种不同的加载模式来获取材料弹性参数。它们是扭转，轴向和横向加载模式。为加速模拟过程，建立了两个不同的有限元模型。采用Abaqus 软件 [20] 进行模拟。图 1-1 显示了用于扭转和横向加载的模型，而图1-2的有限元模型用于轴向加载。对橡胶材料采用C3D8H单元模拟，即八节点实体块状常压力混合单元。扭转和横向加载模型约有 18000 个单元和 75 000 个自由度。轴向加载模型约有7600 个单元和 34000 个自由度。经过若干个循环测试后，计算刚度和测试刚度的三个方向的结果示于图1-3 到 1-5。很明显，模拟结果和试验结果很接近。图1-6 显示了通过客户指定的测试项目的新设计产品。

众所周知，加载-位移曲线的线形可以通过改变 C_{10} 和 C_{01} 来实现。将 C_{10} 改变 $\pm 20\%$ 后对刚度的影响见图 1-7。基线为 0 改变。与基线对比，将 C_{10} 改变 $\pm 20\%$ 后对刚度的影响大约为 16%。

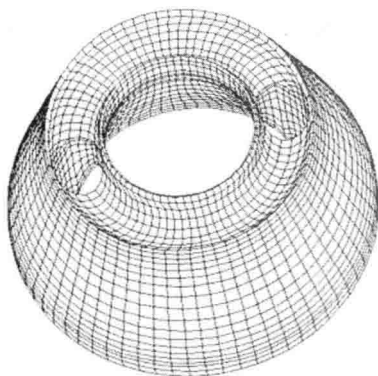


图 1-1 用于扭转和横向加载的有限元模型

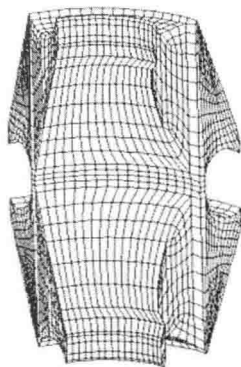


图 1-2 用于轴向加载的有限元模型

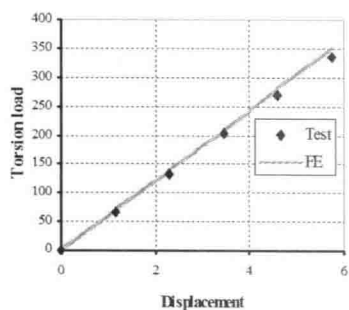


图 1-3. 扭转荷载位移图

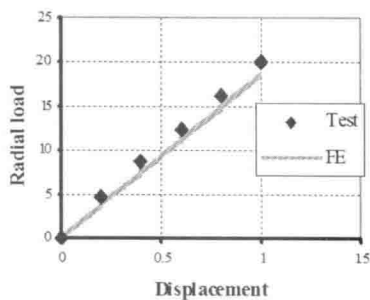


图 1-4 横向荷载位移图

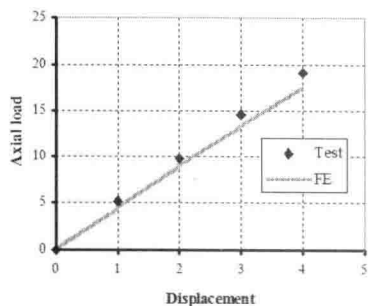


图 1-5. 轴向荷载位移图

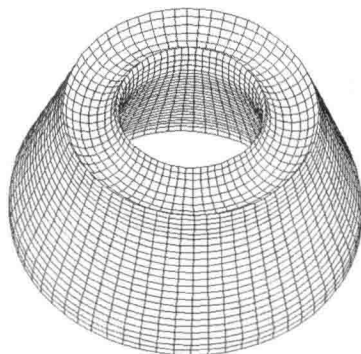


图 1-6 轴套减振器新设计

对 C_{01} 也实行了同样的计算，其结果示于图 1-8。图 1-8 的形态和图 1-7 很相似。但对加载-位移曲线的影响程度远小于 C_{10} 。改变 $C_{01} \pm 20\%$ 所得到的曲线很接近基线，其变化值约为 3.5%，只有对 C_{10} 影响的约 25%。因此， C_{10} 在 Mooney-Rivlin 模型中起主导作用。

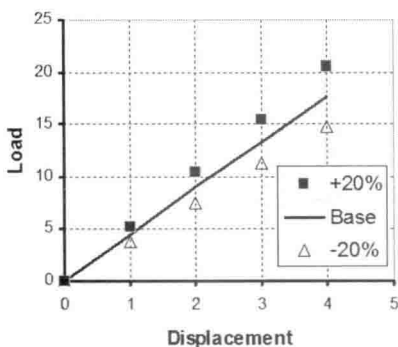


图 1-7. C_{10} 的变化对荷载-变形曲线的影响

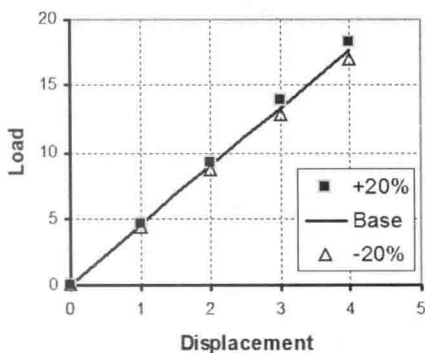


图 1-8 C_{01} 的变化对荷载-变形曲线的影响

我们总结了用该法获取Mooney-Rivlin参数的要点，并建议如下：

1. 在实际应用范围内对不同加载工况进行测试。
2. 设 $C_{01} = (0.1-0.2) C_{10}$ 。
3. 改变 C_{10} 以调整响应曲线的初始梯度。
4. 改变 C_{01} 以调整曲线的线形。
5. D_1 可以忽略或取 0.001 至 0.002 之间的值。

必须指出，在有些情况下，有必要选取高次多项式。以上所述方法不一定适用于高次多项式这种情况（并非理论上不行），但仍有必要用实际减振产品来验证所获得的材料参数。例如，就三次（ $N=3$ ）而言

$$\begin{aligned}
 W = & C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + C_{20} (\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{11} (\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) \\
 & + C_{02} (\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{30} (\bar{I}_1 - 3)^3 + C_{21} (\bar{I}_1 - 3)^2(\bar{I}_2 - 3) \\
 & + C_{12} (\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3)^2 + C_{03} (\bar{I}_2 - 3)^3 + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 + \frac{1}{D_2} (J - 1)^4 \\
 & + \frac{1}{D_3} (J - 1)^6
 \end{aligned}
 \tag{1-8}$$

应当进行合适的不同变形状态下的材料试验，其所得数据应该优化以保证对材料模型的最佳匹配。在材料参数确定后，用实际产品来进行参数验证是必要的。此外，没有必要对不同硬度的同一类型的橡胶材料进行全套材料测试。就橡胶材料而言，它们的剪切模量可以用作参考以确定材料参数。通常获得材料的剪切模量比得到一组材料系数要容易得多。

对已知类型的橡胶材料，其材料系数(C_{ij})是和它的剪切模量成比例的。例如，如果一组剪切模量为1.0 MPa的弹性参数已知，可以用来确定剪切模量为1.5MPa的弹性参数。其方法就是将剪切模量为1.0 MPa的弹性参数增加50%。在工业界的工程设计中，会经常碰到用测试到的荷载-位移曲线来决定橡胶的剪切弹性模量或硬度，或用已知的弹性参数去获得未知产品的材料参数的情况。

1.2 工业案例验证

就减振装置的应用而言，荷载-位移曲线（刚度曲线）是最重要的并且通常是工程运用中最基本的要求。此节将给出若干个准静态下的工业案例和试验以说明在工业界对橡胶减振部件进行模拟的过程。

1.2.1 多向圆形减振器

多向圆形减振器 MDS (Multi-Directional Snubbing) 通常用于发动机装置的减振器。它们容易安装，只需单个螺栓就可将一对减振器连在一起使用。对连接孔没有半径和特殊的倒角加工要求，法兰盘会防止橡胶在安装支撑面上的磨损。内嵌的粘结钢杯可以限制减振器竖向位移并防止产生过多的橡胶应变，而钢杯则被封在橡胶体内以免于腐蚀。这种设计是对解决隔振，减少噪音和控制位移，特别是对车辆在复杂状态下的运营要求提供了一个有效的方案。图 1-9 显示了单个的多向圆形减振器，其主要尺寸示于图 1-10。在实际减振应用中，该类型减振器成对安装在发动机装置上并在两端施以 5 mm 的竖向预加位移。实际应用时，一般都要求提供准静态的荷载-位移曲线。因此，以 10 mm/分钟的速率对其进行加载试验来获得在准静态下的荷载-位移曲线，如图 1-11 所示。



图 1-9 多向圆形减振器

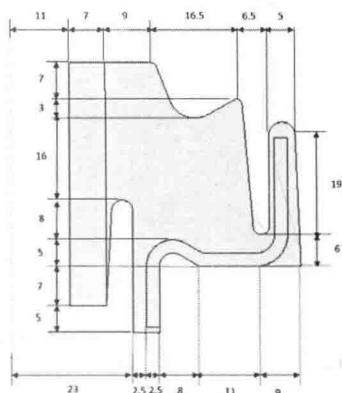


图 1-10 多向圆形减振器的主要尺寸

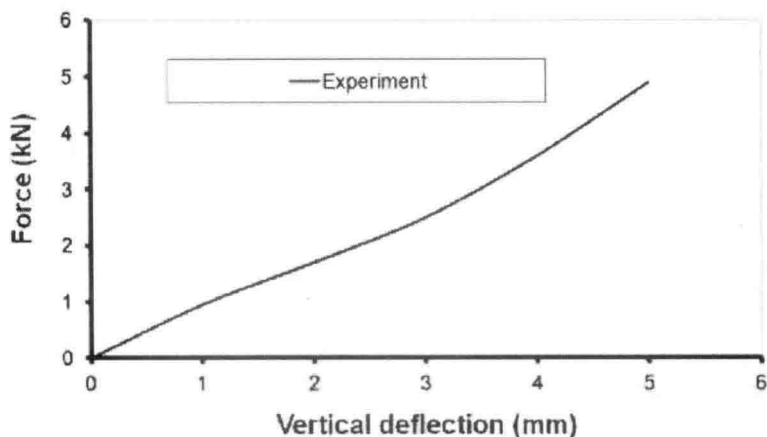


图 1-11 多向圆形减振器的准静态荷载-位移曲线

图1-12显示的是一对多向圆形减振器的有限元模型。模型中有两种材料，一是中碳钢（模拟成线性材料），二是橡胶（超弹性材料）。三维全积分常压空间单元(C3D8H) 模拟橡胶材料而钢用标准的空间块状有限元 (C3D8) 来模拟。在有可能接触的地方设置了接触对或自我接触面。模型的自由度约为40万个。

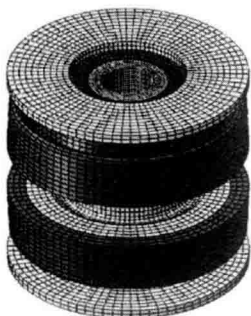


图 1-12 一对多向圆形减振器有限元模型

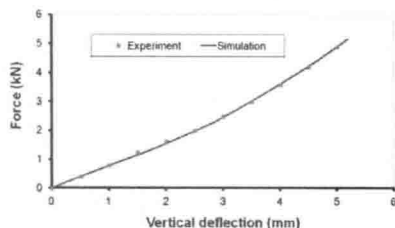


图 1-13 多向圆形减振器准静态荷载-位移曲线对比

我们采用应变能密度的多项式模型来分析该减振器。考虑到在静荷载后的冲击工况有可能遇到极大变形，采用高次多项式 $N=3$ 来模拟橡胶材料。准静态模拟结果和实验结果的对比示于图1-13。由图可见，两者吻合很好，说明橡胶材料的选择合理，从而刚度矩阵 $[K]$ 也是正确的。所以，进一步的冲击模拟分析可在此准静态模拟的基础上进行，见第五章。

1.2.2 偏心夹层减振器

偏心夹层减振器广泛应用于铁路车辆中。它们可以用于主悬挂装置也可以用于二次悬挂装置。一般来说，对铁路车辆悬挂装置有两个主要的性能要求，其中之一就是刚度要求。其要求的荷载-位移曲线需要达到指定的极端状态。这里要分析的偏心夹层减振器带有金属板并在制造过程中和橡胶粘接在一起。这种橡胶弹簧用于铁路车辆的主悬挂装置，置于转向架的车轴之上。营运条件下证实其在控制竖向和横向位移方面效果良好。它们通常成对使用并与竖向成一定角度，受载时处于剪切和压缩状态，能提供三方向的线性刚度。正常尺寸从端板算起大约为高度 245 毫米，厚度 135 毫米，宽度 295 毫米。在实验室和正常运营中，安放角度为对竖轴成 13 度。图 1-14 显示了在试验台上的一对标有加载方向的该减振器。

基于荷载和装置的对称性，只需模拟其中一个减振器即可。四层橡胶和五层钢板均用三维块状单元来模拟，即 C3D8H 用于橡胶而 C3D8 用于钢板。为方便起见，使用的坐标系对竖轴旋转了一个安装角度。使用的全部单元数约为 65000，自由度约为 290000。有限元模型示于图 1-15。在加载模拟过程中，部件的一端在 x 、 y 和 z 方向被固定，竖向荷载加于部件的另一端。