

# 复杂截面导轨变形的计算机辅助分析

张淼, 陈君若, 袁名松, 管锋  
(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093)

**摘要:** 用有限元方法分析复杂截面导轨在均布载荷作用(当承载货物时)下的变形情况. 用米赛斯准则为判据, 以有限元分析软件 ANSYS 为工具, 给出了导轨在均布载荷作用下, 其应力、应变及变形的情况, 提出了一种分析导轨受力变形的有效方法. 确定出了极限载荷  $F_{\max}$ , 并应用试验结果对计算结果进行了验证.

**关键词:** CAE; 米赛斯(Mises)准则; 极限载荷

**中图分类号:** TP391.77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0034-04

## Analysis of Deformation of Complex Section Rail by CAE

ZHANG Miao, CHEN Jun-ruo, YUAN Ming-song, GUAN Feng

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The deformation of complex section rail on the condition of well-proportioned load is analyzed. By means of Mises yield criterion and FEM software ANSYS, the distribution of deformation, stress and strain of the rail is shown in an animate way to provide an efficient way to analyze the deformation of rail load. The results can be treated as the reference to solve relative problems. The maximal load has been confirmed and the calculation result has been verified by the experiment.

**Key words:** CAE; Mises rule; the maximal load

## 0 引言

计算机辅助工程分析(CAE)是产品开发过程中利用计算机技术,对产品在不同因素(力、热及耦合)作用下,可能出现的温度、应力、变形破坏等进行模拟和仿真. CAE 与 CAD/CAM 技术组成了目前产品开发的三大支撑技术.

本文根据某企业的要求,在复杂截面导轨成形加工之前,分析并仿真出导轨在不同的载荷作用下的应力、应变及变形的情况,对其导轨的机械设计提出合理性的建议和结构的优化方案.

## 1 有限元方法的基本构架

有限元方法是将被研究的工程系统(Engineering System)转化成有限元系统(Finite Element System),该有限元系统由节点(Node)及元素(Element)组合而成,以取代原有的工程系统.有限元系统可以转化成数学模式,并根据该数学模式,进而得到该有限元系统的解答,并通过节点、元素表现出来.完整有限元模型除了节点、元素外,还包含工程系统本身所具有的边界条件:约束条件、外力的负载等.<sup>[1]</sup>

## 2 屈服准则<sup>[2]</sup>

### 2.1 屈服准则的应用意义

求解弹塑性问题,首先必须判明材料是否已经全部或部分地进入了塑性状态.如果完全没有进入塑性范围,则属于弹性力学问题;如果只是部分进入塑性范围,则属于弹塑性平衡问题.因此,需要有一个能判

收稿日期:2002-10-23.

第一作者简介:张淼(1976.9~),女,硕士;主要研究方向:材料加工过程的计算机模拟.

别塑性状态是否已经出现的准则, 这种准则称为屈服准则。

由材料的简单拉伸、压缩试验可知, 当应力数值达到材料的屈服极限  $\sigma_s$  时, 出现屈服现象, 产生塑性变形, 即材料进入塑性状态. 因此  $\sigma = \sigma_s$  就是简单应力状态下的屈服准则。

然而, 在复杂应力状态下, 某一点的应力是由六个应力分量或者三个主应力确定的, 此时可能的应力组合有无限多种, 无法一一进行实验以判定其中哪些组合使材料产生屈服. 有如材料力学中强度理论的提出一样, 这里需要提出假说. 屈服准则就是考虑任何可能的应力组合下, 有关产生屈服状态条件的一种假说。

## 2.2 米赛斯(Mises) 准则

米赛斯提出, 当偏应力张量第二不变量的平方根  $(J_2)^{\frac{1}{2}}$  达到某一数值时, 材料开始进入塑性状态, 即准则可表示为:

$$(J_2)^{\frac{1}{2}} = K(k) \quad (1)$$

$$\text{又可写成: } \bar{\sigma} = \sqrt{3}K \quad (2)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  称为等效应力, 且

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

或用主应力表示为:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

若用应力分量来表示, 有

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

对于单向应力状态,  $\sigma_x = \sigma, \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ , 则等效应力就等于单向正应力  $\sigma$ . 因此,  $\sqrt{3}K$  即为材料单向拉伸时的屈服极限, 故有  $\sqrt{3}K = \sigma_s$ .

大量实验表明, 对于塑性的金属材料, 米赛斯准则更加符合实际情况。

## 3 分析工具及计算方法

本文以大型有限元分析软件 ANSYS 为分析工具, 以承载货物的复杂截面导轨为分析对象, 其材料特性如表 1 所示, 物理模型如图 1 所示, 导轨的横截面如图 3 所示, 分析导轨在载荷作用下的变形情况. 本问题可视为结构静力问题, 将连续导轨取出两跨作为研究对象, 两端可视为固定约束, 中间支撑为铰支, 滚轮可看作沿导轨宽度的均布载荷 (3 000 N) 施加在导轨的上表面。

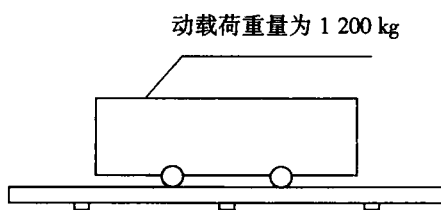


图1 物理模型

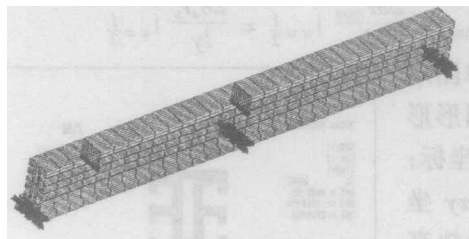


图2 有限元模型

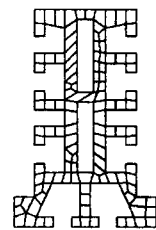


图3 有限元模型截面图

在模拟仿真过程中, 选用“结构 - 静力”分析模块, 采用 Solid45 号单元类型将计算模型划分为 8 686 个单元, 16 869 个节点, 输入材料的物性参数 (如表 1 所示), 施加均布载荷及约束条件, 得到有限元模型如图 2 所示, 其截面图如图 3 所示。

表1 材料特性

材 料	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$
锻 铝	$2.7 \times 10^3$	$7.0 \times 10^4$	0.3	160	110

### 4 计算结果与数据

ANSYS 强大的后处理功能可以方便地以各种方式表示分析结果,其中动画方式可以仿真指定结果的变化情况.本文以动画方式仿真复杂截面导轨在均布载荷作用下变形、应力、应变的变化情况.图4为导轨最大压应力示意图,图5为导轨最大拉应力示意图.

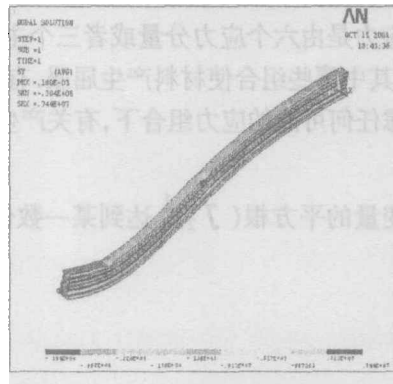


图4 导轨最大压应力



图5 导轨最大拉应力

由于导轨所用的材料为锻铝,其性能参数如下: $E = 70 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_b = 160 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 110 \text{ MPa}$ ,如上所述,本次计算在  $y$  方向上的最大压应力和

最大拉应力分别为  $30.4 \text{ MPa}$  和  $7.44 \text{ MPa}$ ,在  $z$  方向上的最大拉应力和最大压应力分别为  $10.3 \text{ MPa}$  和  $15.2 \text{ MPa}$ ,最大等效应力(Mises 应力)为  $29.0 \text{ MPa}$ .

综上所述,计算数据均小于材料的屈服强度  $\sigma_s$ ,所以导轨在本计算模型均布载荷的作用下发生的是弹性变形;在  $y$  方向上的最大变形量为  $0.180 \text{ mm}$ ,不会对小车的运行产生影响.因此该材料、该截面形状的导轨在该载荷作用下是可以使用的.

### 5 导轨极限载荷 $F_{\max}$ 的确定

为了防止在使用过程中发生意外事故,延长导轨的使用寿命,我们可以应用材料力学的相关知识分析出该导轨发生塑性变形(当  $\sigma_{\max} \geq \sigma_s$  时,导轨发生塑性变形)时作用在其上表面的均布载荷的极限值.利用公式(6)求出导轨的极限载荷  $F_{\max} = 8000 \text{ N}$ .<sup>[3]</sup>

$$\text{由: } \sigma_{\max} = \frac{M_{\max} Y}{I_x} \text{ 得: } M_{\max} = \frac{\sigma_{\max} I_x}{y}$$

$$\text{其中: } y = h - \bar{y}; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n A_i}; I_x = I_{xc} + a^2 A$$

$$\text{令: } \sigma_s = \sigma_{\max} \text{ 有: } F_{\max} = \frac{2M_{\max}}{l} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{2\sigma_s I_x}{ly} \Big|_{x=\frac{l}{2}} \tag{6}$$

式中: $A_i$ —任一简单图形的面积; $\bar{y}_i$ —任一简单图形形心在  $Oxy$  坐标系中的纵坐标; $\bar{y}$ —导轨截面形心在  $Oxy$  坐标系中的纵坐标; $h$ —导轨高度; $y$ —应力点到中性轴的距离; $I_{xc}$ —截面对形心轴的惯性矩; $a$ —截面形心在  $Oxy$  坐标系中的纵坐标; $A$ —截面面积; $I_x$ —截面对任意的  $x$  轴的惯性矩; $M_{\max}$ —横截面上的最大弯矩; $\sigma_{\max}$ —最大应力; $\sigma_s$ —材料的屈服极限; $F_{\max}$ —极限载荷.

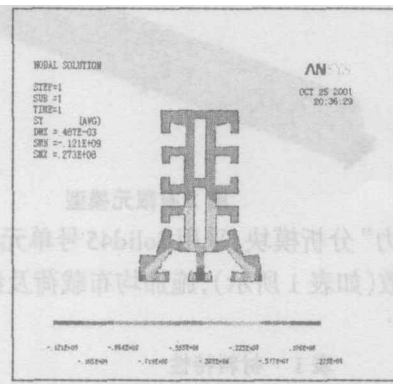


图6 导轨所受最大压应力处的截面应力

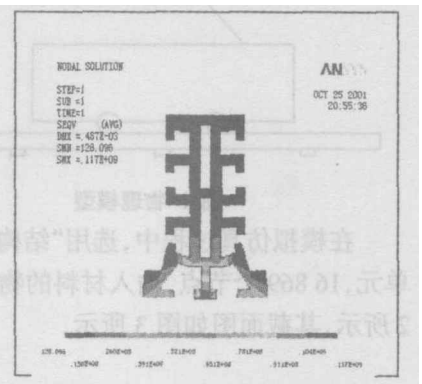


图7 最大等效应力处的截面应力

应用 ANSYS 有限元分析软件, 我们计算出导轨在 8 000 N 的均布载荷作用下,  $y$  方向上的最大压应力为 121 MPa, 最大等效应力 (Von Mises 应力) 为 117 MPa, 均超过了材料的屈服强度  $\sigma_s$ , 如下所示: 图 6 为导轨所受最大压应力处的截面应力云图, 图 7 为最大等效应力处的截面应力云图. 在试验中, 我们在导轨的上表面施加 8 000 N 的载荷, 结果在此载荷作用下导轨发生塑性变形, 表明计算结果与试验结果基本吻合.

## 6 结 论

采用有限元数值分析方法, 根据米赛斯 (Mises) 准则, 使用大型有限元分析软件 ANSYS, 分析复杂截面导轨在均布载荷作用下的变形情况, 提供了一种在导轨成形加工之前仿真导轨变形情况的方法, 可以有目的地预测并避免可能出现的问题, 并为解决问题提供参考依据.

### 参考文献:

- [1] 陈精一, 等. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. 9 ~ 10.
- [2] 刘北辰, 等. 工程计算力学——理论与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 477 ~ 480.
- [3] 孙训方, 等. 材料力学 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 215, 388 ~ 401.

(上接第 21 页)

### 参考文献:

- [1] 徐泽玮. 电源技术中应用的软磁铁氧体材料发展回顾和分析(一) [J]. 金属功能材料, 2001, 8(5): 1 ~ 7.
- [2] 黄刚. 软磁铁氧体的市场综述 [J]. 电子外贸, 1999, 6: 24 ~ 26.
- [3] 唐敏, 思潮. 软磁铁氧体的应用和技术 [J]. 世界电子元器件, 1999, 7: 65 ~ 66.
- [4] 徐敏, 邬文波. 浅谈现代功率铁氧体材料的现状及发展方向 [J]. 磁性材料及器件, 1999, 30(5): 42 ~ 50.
- [5] 何水校. 锰锌铁氧体材料的未来发展动向 [J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(6): 27 ~ 30.
- [6] 王耕福. 不断发展的软磁铁氧体技术 [J]. 世界产品与技术, 2000, 8, 24 ~ 27.
- [7] 廖绍彬. 高磁导率软磁铁氧体材料的应用 [J]. 电子元器件应用, 2000, 2(7): 19 ~ 20.
- [8] 陈国华. 21 世纪软磁铁氧体材料和元件发展趋势 [J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(4): 34 ~ 36.
- [9] 刘玉红. 软磁铁氧体材料的现状及其发展趋势 [J]. 材料导报, 2000, 14(7): 30 ~ 31.
- [10] 翁兴国. NiZn 软磁铁氧体材料应用与市场发展 [J]. 新材料产业, 2002, 4, 23 ~ 24.
- [11] 何水校. 软磁铁氧体材料的应用与市场 [J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(1): 44 ~ 47.
- [12] 余声明. 迈向新世纪的此行科学技术(二) [J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(5): 1 ~ 9.