


轨道车辆结构 分析理论

R
AIL VEHICLE STRUCTURE
ANALYSIS THEORY

田红旗 编著

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

田红旗 编著

轨道车辆结构 分析理论

RAIL VEHICLE STRUCTURE
ANALYSIS THEORY
中南大学出版社

封面设计/易红卫

ISBN 978-7-81105-713-3




9 787811 057133 >

定价：36.00元

轨道车辆结构 分析理论

RAIL VEHICLE STRUCTURE
ANALYSIS THEORY

田红旗 编著

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆结构分析理论/田红旗编著. —长沙:中南大学出版社, 2009. 3

ISBN 978 - 7 - 81105 - 713 - 3

I. 轨... II. 田... III. 轨道车 - 结构分析 - 理论
IV. U216.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 035279 号

轨道车辆结构分析理论

田红旗 编著

责任编辑 陈雪萍 唐少军

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

印 装 湖南精工彩色印刷有限公司

开 本 880 × 1230 1/32 印张 12 字数 342 千字 插页

版 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 81105 - 713 - 3

定 价 36.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

作者从 20 世纪 80 年代中期开始进行轨道车辆结构强度方面的研究。到目前为止，完成或主持完成的车辆结构强度计算与分析的车型/车种有 70 余种，包括提速客运列车的客车和机车，提速和高速动车组的动车和拖车，磁浮高速列车的车辆，货运列车的敞车、棚车、平车、罐车、特种货车、专用货车以及出口货车等。

轨道车辆结构强度计算与分析的内容包括静强度和动强度问题、结构和材料非线性问题。由于目前机械类和交通运输类的本科专业很少开设结构力学、弹塑性力学、板壳理论等基础课程，因此，在“载运工具运用工程”专业的研究生培养中需要增加这些内容。

正是在上述背景下，作者以多年来为研究生讲授的学位课程《弹塑性力学有限单元法》讲稿为基础，结合研究生培养和科研工作的经验，编著了本书。

全书共八章，包括轨道车辆承受的载荷及结构分析标准、杆系结构计算理论基础、线弹性结构计算理论基础、弹性静动力学有限单元法、材料和几何非线性理论、轨道车辆结构弹性静动强度分析方法、线性及非线性计算实例。

在本书出版之际，作者谨向支持、关心作者的各有关单位、个人致以诚挚的谢意。特别感谢导师中南大学的卢执中教授，本书内容渗透着导师的心血和智慧。卢执中教授仔细审阅并修改了全部书稿，中南大学的鲁寨军老师、姚松老师、高广军老师、姚曙光老师核查了书稿中的所有公式，提供了算例。特别感谢中南大学轨道交通安全实验室的同事们多年来的支持与团结合作。衷心感谢中南大

学出版社的大力支持、精心审稿与编辑。

限于作者水平，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

本书可供从事轨道车辆方面的科研人员、教师和工程技术人员使用，也可作为研究生或本科生的教材或参考书。

作者
2008年12月7日
于长沙

第一章 绪 论	(1)
1.1 轨道车辆结构分析的主要内容	(1)
1.2 有限单元法的基本概念	(2)
1.3 涉及的力学基础理论	(8)
1.4 本书涵盖的内容	(10)
第二章 轨道车辆承受的载荷及结构分析标准	(12)
2.1 作用于车体上的载荷和组合	(13)
2.1.1 作用于车体上载荷	(13)
2.1.2 作用于车体上载荷的组合	(24)
2.2 作用于转向架上的载荷和组合	(25)
2.2.1 作用于转向架上的载荷	(25)
2.2.2 作用于转向架上载荷的组合	(45)
2.3 轨道车辆结构分析标准	(45)
第三章 杆系结构计算理论基础	(47)
3.1 静定结构与超静定结构	(47)
3.1.1 几何不变体系	(47)
3.1.2 静定结构、超静定结构	(49)
3.2 结构位移计算	(51)
3.2.1 虚功和虚功原理	(51)
3.2.2 载荷作用下的静定结构位移计算	(54)
3.2.3 弹性结构的互等定理	(57)
3.3 力法	(59)

3.3.1	超静定结构多余联系解除方法	(59)
3.3.2	力法基本原理	(61)
3.3.3	力法的典型方程及计算步骤	(63)
3.3.4	结构对称性利用	(65)
3.4	位移法	(68)
3.4.1	等截面直梁的转角位移方程	(69)
3.4.2	等截面直梁支座位移的杆端内力	(71)
3.4.3	位移法的基本未知数和基本结构	(72)
3.4.4	位移法的典型方程及计算步骤	(75)
3.4.5	结构对称性利用	(77)

第四章 线弹性体结构计算理论基础 (79)

4.1	线弹性体结构计算概述	(79)
4.2	弹性力学中的几个基本概念	(80)
4.2.1	作用于弹性体的外力	(80)
4.2.2	应力与应力状态	(82)
4.2.3	位移、形变与形变状态	(85)
4.3	弹性力学中的几个基本假设	(86)
4.4	弹性力学空间问题基本方程	(87)
4.4.1	平衡微分方程	(88)
4.4.2	应力分量边界值与面力分量的关系	(89)
4.4.3	主应力和应力不变量	(90)
4.4.4	最大、最小正应力和剪应力	(93)
4.4.5	位移分量、应变分量、几何方程	(95)
4.4.6	主应变和应变不变量	(99)
4.4.7	物理方程	(100)
4.5	弹性力学平面问题物理方程	(102)
4.5.1	平面应力问题	(102)
4.5.2	平面应变问题	(103)
4.6	弹性力学基本方程的矩阵、张量形式	(104)
4.6.1	基本方程的矩阵形式	(104)

4.6.2	基本方程的张量形式	(107)
4.7	微分方程等效积分“弱”形式的虚功原理	(111)
4.7.1	等效积分的“弱”形式	(112)
4.7.2	虚位移原理	(113)
4.7.3	虚应力原理	(115)
第五章	弹性静力学问题有限单元法	(119)
5.1	杆系结构基本单元	(119)
5.1.1	二力杆单元	(120)
5.1.2	等截面直梁单元	(128)
5.2	杆系结构静力分析过程	(133)
5.2.1	桁架结构静力分析	(133)
5.2.2	结构静力分析过程小结	(143)
5.3	平面问题基本单元	(146)
5.3.1	常应变三结点三角形平板单元	(147)
5.3.2	双线性位移模式四结点矩形平板单元	(154)
5.3.3	等参曲边平板单元——曲边四边形平板单元	(159)
5.4	单元位移模式及有限单元法解的收敛	(165)
5.5	空间问题基本单元	(169)
5.5.1	常应变四面体单元	(169)
5.5.2	轴对称问题的三角形截面环单元	(172)
5.6	承受法向载荷的二维形状单元	(177)
5.6.1	四结点矩形弯曲板单元	(178)
5.6.2	平面壳体单元	(183)
5.7	等参单元数值积分法	(185)
5.7.1	数值积分概述	(185)
5.7.2	一维高斯积分	(186)
5.7.3	二维、三维高斯积分	(189)
5.8	大型线性方程组的解法	(190)
5.8.1	矩阵三角分解法的基本原理	(190)

5.8.2	平方根法(Cholesky 分解法)	(191)
5.8.3	改进的平方根法($L \cdot D \cdot L^T$ 分解法)	(192)
5.9	轨道车辆结构静强度计算	(194)
5.9.1	建立结构计算力学模型	(194)
5.9.2	选定用于结构计算的载荷及其组合方式	(197)
5.9.3	互联单元的偏心连接——主从结点及虚拟弹性臂单元	(199)
5.9.4	关于应力计算结果的处理	(209)
第六章 弹性动力学问题有限单元法		(211)
6.1	弹性动力学有关问题	(211)
6.1.1	动力学问题分类	(211)
6.1.2	动力荷载	(212)
6.1.3	结构计算过程	(213)
6.2	质量矩阵	(214)
6.3	固有振动频率和主振型	(217)
6.3.1	结构的固有振动频率和主振型	(217)
6.3.2	正则振型的幅值及其对质量、刚度矩阵的正交性	(219)
6.4	模态分析与动力求解的振型叠加法	(222)
6.4.1	模态分析	(223)
6.4.2	求解单自由度系统振动方程	(230)
6.4.3	振型叠加法进行动力求解的全过程	(236)
6.5	大型特征值问题的解法	(238)
6.5.1	逆迭代法	(238)
6.5.2	子空间迭代法	(243)
6.5.3	Ritz 向量、Lanczos 向量直接叠加法	(244)
6.6	动力求解的直接积分法	(250)
6.6.1	中心差分法	(251)
6.6.2	Newmark 方法	(256)
6.6.3	Wilson- θ 法基本原理	(259)

6.7	轨道车辆结构动强度分析	(260)
第七章	材料非线性理论	(263)
7.1	材料塑性变形与非线性问题	(263)
7.2	塑性力学基础知识	(264)
7.2.1	材料塑性变形的规律及特点	(264)
7.2.2	应力、应变状态	(272)
7.2.3	应变速率、应变增量、应力增量	(276)
7.3	塑性力学基本方程	(278)
7.3.1	复杂应力状态下弹性区与塑性区分界面的确定	(279)
7.3.2	杜拉克 (Drucker) 强化公设	(288)
7.3.3	增量理论、增量型(弹)塑性本构关系	(291)
7.3.4	全量理论、全量型弹塑性本构关系	(298)
7.4	非线性代数方程组的数值解法	(305)
7.4.1	直接迭代法	(305)
7.4.2	牛顿法和修正的牛顿法	(307)
7.4.3	增量法	(309)
7.5	材料非线性问题有限单元法	(313)
7.5.1	材料非线性弹性问题有限单元法	(314)
7.5.2	材料弹塑性问题有限单元法	(315)
7.5.3	载荷增量步长的自动选择	(323)
7.6	轨道车辆结构分析的材料非线性计算	(325)
第八章	几何非线性理论	(327)
8.1	几何非线性问题的应变、应力度量	(327)
8.1.1	几何方程与应变度量	(327)
8.1.2	应力度量	(331)
8.2	几何非线性问题的平衡方程与虚位移原理	(337)
8.2.1	力的平衡方程	(337)
8.2.2	虚位移原理	(339)

8.2.3	虚位移方程线性化	(343)
8.3	几何非线性问题的本构关系	(345)
8.3.1	大位移、大转动、小应变问题的本构关系	(345)
8.3.2	大位移、大转动、大应变问题的本构关系	(347)
8.4	几何非线性问题有限单元法	(352)
8.4.1	建立有限元求解方程	(352)
8.4.2	方程解法	(355)
8.5	结构稳定性和屈曲问题	(359)
8.5.1	结构失稳的临界载荷	(359)
8.5.2	线性稳定性分析	(362)
8.5.3	非线性稳定性分析	(363)
8.6	轨道车辆结构稳定性分析实例	(365)
8.6.1	建立计算力学模型	(365)
8.6.2	结构静力分析	(367)
8.6.3	线性稳定性分析	(367)
8.6.4	非线性稳定性分析	(368)
参考文献		(372)

第一章 绪 论

轨道交通行业的首要任务是保证列车运行安全，这涉及很多方面，其中非常重要的一环是车辆结构的强度、刚度必须满足运输使用要求。因此，车辆结构设计人员应掌握车辆结构强度、刚度的计算分析方法及相关理论。

轨道车辆结构计算现已普遍采用有限单元法，这是一种数值计算方法，而计算所用的理论则属于力学范畴。随着列车运行速度的不断提高，车辆结构在满足强度、刚度的前提下，还必须尽可能减轻自重，以降低轮轨之间的动作用力及无效的能耗；为进一步保障行车安全，国内外又新发展了对乘员提供被动安全保护的耐冲击吸能安全车体。因此，车辆结构设计，从仅进行静力计算发展到需进行动强度考核和关键零部件的疲劳寿命分析，由线性问题发展到非线性问题，从而导致车辆结构计算涉及的力学基础理论越来越多，包括理论力学、材料力学、结构力学、结构动力学、弹塑性力学、列车多体耦合撞击动力学等。不同的计算内容，所需的力学理论也不同，因此，奠定有关的力学基础，是掌握力学问题有限单元法的必要环节。

1.1 轨道车辆结构分析的主要内容

本书所指的“轨道车辆”包括铁路机车车辆和城轨车辆等。

车辆结构分析的目的是为了确定车辆承载结构在运用载荷作用下具有的承载能力，保证其在使用期内的安全性和可靠性；同时应尽量减小车辆及其部件的结构自重，充分发挥结构的整体承载能力。

对车辆结构无论进行何种内容的计算，都必须解决下述三个

问题:

其一,确定车辆在运用过程中各主要零部件承受的各种载荷及其组合方式是车辆结构分析的首要一步。对此,世界各国铁路行业都是通过大量试验并结合力学理论进行分析,定出必要的规范或标准作为车辆结构分析的依据,这些规范及标准还必须根据技术的发展不断进行修订和补充。

其二,根据确定的载荷,对车辆结构采用有限单元法进行静力分析,并以此为基础,进一步根据需要开展其他相关内容的计算,求解载荷作用下产生的应力和变形。

其三,计算结果评定,考核车辆结构是否满足安全可靠需求。为此,首先需结合车辆结构所用材料的物理性能,进行各种试验和力学理论分析,制定出考核标准,其主要内容必须包含车辆各主要零部件在安全和一定使用寿命条件下允许产生的最大应力(即许用应力)和最大变形(即刚度标准)。据此,将计算结果与许用应力和允许的最大变形进行比较,确定车体结构强度、刚度是否满足使用要求。

1.2 有限单元法的基本概念

有限单元法是结合电子计算机技术发展起来的一种数值计算方法,其基本思想是将连续的求解域用一定数量的单元进行离散,各单元间只在数目有限的、称之为“结点”的指定点处相连,从而将无限的求解域转换为求解有限个单元集成的组合体。单元可以有不同形状,便于几何形状复杂的求解域模型化。对每一种形状的单元用一近似函数来描述,这一近似函数通常由未知场函数(标量场或矢量场)或者其导数在单元结点的值和其插值函数来表达,单元结点上的这些值是有限单元分析中需要求解的未知量,解得这些未知量后,即可通过插值函数计算出各个场函数的近似值,从而得到整个求解域上的近似解。随着单元数目的增加和插值函数精度的提高,解的近似程度将不断改进,如果单元满足收敛要求,近似解最后将收敛于精确解。

有限单元法未推广应用前,车辆结构的静力分析,是将车辆简化为杆系结构,用结构力学的力法进行结构强度计算。显然,这种简化与实际结构有较大差异,而且限于当时的计算条件,结构的超静定次数不能太多,故只能说是一种估算,主要依靠试验来评价结构的强度和刚度。

工程上应用有限单元法,始于力学领域。1956年,美国的 M. J. Turner、R. W. Clough 等人,根据结构力学位移法原理,用三角形单元按弹性力学平面应力问题对飞机结构进行静力分析,取得了成功;1960年 R. W. Clough 开始采用“有限单元法”这一术语。40余年来,有限单元法结合电子计算机技术得到了迅猛发展,分析对象由弹性力学扩展到塑性力学,由固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质领域;分析功能由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力问题和波动问题;其作用由分析和校核扩展到优化设计。今后,随着力学、计算数学和电子计算机技术的进一步发展,有限单元法在科学技术发展和工程应用中必将发挥更大的作用,其自身也会更臻完善。

基于结构力学求解杆系结构的位移法原理,建立用于分析结构强度、刚度的力学问题有限单元法,是以结点位移作为未知量进行求解;以后又发展了基于结构力学力法原理的有限单元法,即以结点力作为未知量进行计算。随着所取未知量的不同,有限单元法在力学分析中分别有位移法、力法和两种未知量混用的混合法三种,但目前用得最多的仍然是基于结构力学位移法的有限单元法,本书也是介绍这种计算方法。

上述概念,通过对 32.5 t 轴重货车转向架摇枕在垂向载荷作用下的强度、刚度计算实例,予以直观说明。其计算具体步骤如下。

(1) 建立几何模型

根据计算对象,绘制与其形状相同的几何模型,要求与原结构尽可能一致,并尽量利用结构的对称性(详见第三章)。图 1-1 所示为本计算实例的摇枕沿车辆纵向剖开的 1/2 结构几何模型图。

当摇枕仅有垂向载荷作用时,摇枕的 1/2 结构既可按图 1-1 所示方式选取,也可沿摇枕纵向剖分,甚至可仅取 1/4 结构。无论采用何种形式利用结构对称性,其最终计算结果都一样。

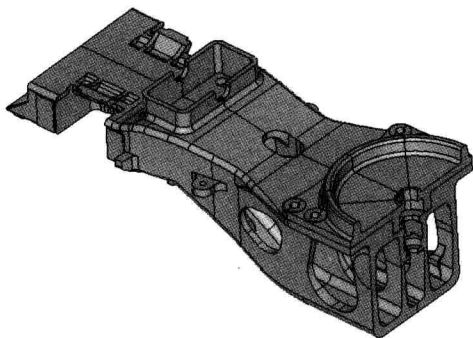


图 1-1 摇枕 1/2 结构几何模型图

(2) 建立离散模型

基于结构力学位移法的力学问题有限单元法,建立了多种不同形状,分别适用于不同类型结构、不同变形情况的单元,其适用性和计算精度取决于描述单元位移状态、称之为“位移模式”(或位移函数)的近似函数。不同单元有不同的位移模式,因此,根据结构的具体几何形状及承载情况,正确选择用于离散结构的单元,关系到计算结果的正确性与精度。

由于摇枕为铸钢件,采用块体单元比较合适,这里选用四结点四面体单元进行离散(这是一种最简单的离散方式,但非最佳方式)。单元离散的模型示于图 1-2;图 1-3 所示为采用的四结点四面体单元。

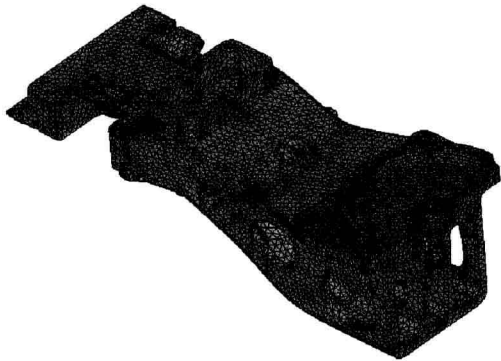


图 1-2 摇枕 1/2 结构离散模型图

由图 1-2 可见, 结构用单元离散后, 成为只在单元结点处相联系的有限个单元组成的组合体, 基于结构力学位移法的力学问题有限单元法是以单元各结点的位移分量作为未知量, 其计算的基础就是单元位移模式这一近似函数(在进一步求解前, 需将其转

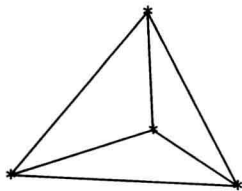


图 1-3 四结点四面体单元

换为与单元结点值相联系), 称之为形函数的插值函数。解得各结点的位移分量后, 即可通过形函数得到单元内任一点相应的位移分量, 再根据相关力学理论建立的应变、应力矩阵进一步解得应变和应力。由此可见, 尽管是有限个单元体, 其结点数量却不少, 每一结点的位移分量(或称自由度), 平面问题为 2~3 个, 空间问题为 3~6 个, 对这样大量的未知位移分量进行求解, 必须应用线性代数矩阵理论和电子计算机技术, 否则寸步难行, 不用矩阵理论甚至都无法在书面上进行阐述。譬如, 用 M 个单元离散的空间问题连续体, 得到 n 个结点, 每个结点 6 个自由度, 就会有 $6 \times n$ 个位移分量, 用列矩阵 δ 表示如下:

$$\delta = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ \theta_{z1} \cdots u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi} \cdots u_n \ v_n \ w_n \ \theta_{xn} \ \theta_{yn} \ \theta_{zn}]^T$$

上式为结构各单元结点的未知位移分量列矩阵;

式中: u 、 v 、 w 为结点分别沿坐标轴 x 、 y 、 z 方向的线位移分量, 脚标为结点编码;

θ 为结点角位移分量, 第一脚标表示转动所绕坐标轴, 第二脚标为结点编码。

(3) 施加约束条件和载荷

对于利用结构对称性建立的摇枕离散模型, 由于垂向载荷正对称, 在结构上引起的内力为正对称的轴力和弯矩, 需在剖分面的结点处施加正对称约束, 以保持另一半摇枕的作用(图 1-4)。摇枕两端, 每端由 9 组弹簧支承, 在每组弹簧支承位置, 分别按其垂向、横向刚度施加弹性约束(图 1-4 所示为摇枕端部的横向弹性约束和垂向弹性约束)。按允许轴重求得作用于一台转向架的垂向总载荷, 以均布方式(即: 一台转向架的垂向总载荷除以摇枕下心盘面