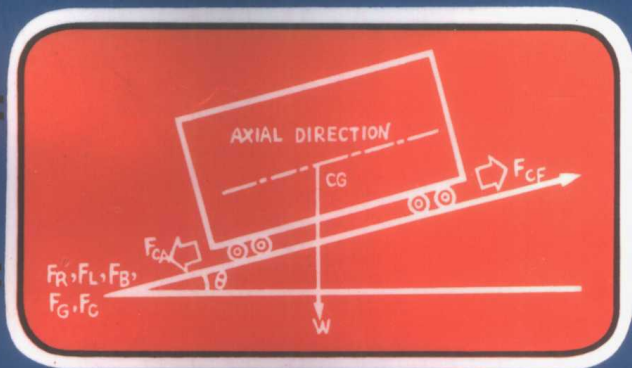


铁道车辆系统动力学

Vijay K. Garg Rao V. Dukkipati

沈利人 翻译 沈志云 校对



西南交通大学出版社

铁道车辆系统动力学

Vijay K. Garg
Rao V. Dukkipati

沈利人 翻译
沈志云 校对

西南交通大学出版社
·成都·

Dynamics of Railway Vehicle Systems

Vijay K. Garg

Rao V. Dukkipati

Academic Press

铁道车辆系统动力学

沈利人 翻 译

沈志云 校 对

出版人：范子亮

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码：610031)

成都飞机工业公司印刷厂印刷

*

开本：850 mm × 1168 mm 1/32 印张：13.6875

字数：344千字 印数：1~500册

1998年9月第1版 1998年9月第1次印刷

ISBN 7-81057-212-1/T·290

定价：25.00元

前 言

“运动中连续不断的喀哒声……原则上产生于这一事实，即机车车轮与钢轨的接触很难连续保持四点共面……”这一从1829年关于铁路运行研究的摘录，写于世界第一条铁路仅仅5岁的时候，充分说明观察的精明。“运动中的喀哒声”可能已经降低，但是由移动着的轮轨接触点所引发的钢轨—车辆动力学问题，仍旧同150年前设计第一个铁路系统时一样，受到当今极大的关注。

铁路在世界商业和世界发展中的重要性是不言而喻的。加拿大作为一个从大西洋延伸到太平洋的国家的存在，应当归功于建设铁路的决定。铁路仍然是功能和效率最高的横跨大陆的重载货物搬运者。铁路网遍布世界所有角落。一个国家对任何新地区的开发决定后，第一个必须满足的要求就是修建铁路。

然而，在铁路维修和运用中存在的问题，常使我们回到过去的时代。用带轮缘的钢轮在钢轨上运行来同时实现支承、导向和牵引，这是一种卓越的光辉思想。但是，这一貌似简单的想法，却隐含着其所产生的运动在动力学方面的复杂性。铁道车辆和车轮的运动是诸如接触力、部件几何形状、悬挂系统、车辆质量—刚度和阻尼等一系列因素相互作用的结果，要求作全面的分析。而且，对铁路动力学的了解也是控制轮—轨磨损和车辆稳定性及可靠性的基础。

铁路工业是非常保守的。仅在最近几年才开始在解决轮—轨—车辆动力学问题中采用科学的现代分析方法。这的确是很复杂的，但是，更高速度和更大装载能力的要求，带来许多磨损和稳定

性方面的新问题,强迫铁路运输人员和装备供应者以更加系统和根本的方法来面对这些问题。

本书首次以完整的、现代解析方法处理轮—轨相互作用及其对车辆动力学的影响。同时,本书还对铁路动力学最新理论及研究成果提供了综合信息来源,通过妥善编排,可以清晰看出有关方程式的推导和应用范围。所以,本书将成为今后分析的向导,并能促使铁路—车辆动力学研究取得新进展,这对于铁路运输不断地顺利发展是很重要的。

虽然铁路技术发展的前一个半世纪以先驱者们的创造和决心而著称,其下一个世纪,将坚实地建立在对所含现象更加完全的认识基础之上。在这方面,本书是对科学分析和研究上有价值的贡献。

加拿大国家研究委员会
渥汰华,安大略,加拿大
E. H. 德基翁

序 言

虽然铁道车辆动力学在现代铁路工程的所有方面都一直占有重要地位,但目前还没有一本书专门论述这一迅速发展的学科。本书概括了铁道车辆数学模型的发展及其在动态分析和设计中的应用。它应能有助于显示分析模型在各种铁道车辆设计活动中的重要地位。

本书包含确定一般铁道车辆系统设计的通用程序和进行详细分析通常所需要的全部资料。特别注重给出方程式的清晰表达和求解的方法。为使读者能在本领域中继续深入,在每章之末均给出有关的参考文献。

作者编辑本书时十分注意使其便于在铁道车辆动力学课程中使用。从事设计和研究的工程师们可从本书选取和发展分析及设计所需要的数学模型。

以下是本书各章的主要特点:第1~4章提供研究铁道车辆动力学要求的必备背景材料。第1章综述单自由度和多自由度系统响应的分析方法,包括确定性和非确定性分析方法。第2章简要讨论线性和非线性动态系统的数值解法,介绍了显式和隐式数值积分方法。第3章概要介绍与铁道车辆及列车组成动态性能有关的各种问题,提供了研究这些问题的几种数学模型。各种轨道不平顺的表达采用了确定性的和非确定性的两种方法。第4章讨论铁道车辆动力学中采用的各种轮—轨滚动接触理论,给出了这些理论的简要描述、应用范围和所受的限制。

第5~8章用于车辆及其部件在直线和曲线轨道上的模拟。在第5章中,列举了单轮对在直线和曲线轨道上运动方程式的详细

推导过程。第6章讨论铁道车辆沿直线轨道运行的动态响应分析模型,推导了货车、机车和客车的运动方程式,采用确定的和随机的轨道输入。第7章研究这些车辆在直线轨道上的横向稳定性。第8章建立了曲线轨道上车辆响应的数学模型。

第9章讨论列车动态性能,概述了与列车纵向、横向和垂向动态性能有关的问题,介绍了准静态和准动态分析方法,建立了列车纵向、横向和垂向动力学分析模型。

第10章为车辆—桥梁相互作用模型,而第11章则介绍铁道车辆动力学模型的试验验证。

全书使用矢量和矩阵符号。这里设想读者已具有微积分、常微分方程、矢量和矩阵代数以及动力学方面的基础知识。

致 谢

本书的形成受到工作在铁道车辆动力学领域众多人们的影响。作者十分感激各位同行和他们的建议，并向在本领域提供文献作了贡献的广大作者致谢。我们非常感激北美铁路协会研究试验部^{*}和加拿大国家研究委员会所给予的鼓励。我们深深感谢 W. J. Harris 博士, E. H. Dudgeon 先生, G. H. Way 先生, J. G. Britton 先生, K. L. Hawthorne 先生和 C. A. M. Smith 先生在本书编写的全过程中所慷慨给予的鼓励和指导。还要感谢 R. Breese 博士校阅手稿和 M. Farahmandpour 先生整理图表。我们要向 H. S. Cuccaro 夫人和 Sandro Lobo 夫人致谢, 感谢她们出色地打印了手稿。我们还要感谢科学出版社工作人员的大力协助。最后, 我们感谢家人的鼓励、耐心和支持, 尤其是我们的夫人 Pushpa 和 Sudha。

• V. K. 伽格在北美铁路协会工作直到 1984 年 8 月。

翻 译 说 明

1. 一般人名均用原文,以人名命名的定理、理论、公式或专用名称,则用中译名,在本书第一次出现时用括号附原文。
2. 一般地名及国名均用中译名,地区及中小城镇则用原文名。
3. 一般国际性期刊及著名出版社用中译名,个别不常见或专用名称则用原文。
4. 所有计量单位均用原文缩写。本书常见单位缩写及其中文全称和换算见表 0.1:

表 0.1

原书所用缩写	中 文 全 称	国际单位制换算
in, IN	英寸	25.4 mm
ft, FT, FEET	英尺	0.3048 m
mile, Mile, MILE	英里	1.61 km
lb, LB, LBS	英磅	4.45 N
KIPS	千磅	4.45 kN
mph, MPH	英里/小时	1.61 km/h
psi, PSI	英磅/平方英尺	6.89 kPa
cpf, CPF	周/英尺(空间频率)	3.28 cycle/m
ft/SEC ²	英尺/秒 ² (加速度)	0.3048 m/s ²
deg, DEG	度(角度)	°
rad, RAD	弧度	rad
S, SEC	秒	s
Hr, HOUR	小时	h
HZ, Hz, cps	赫兹	Hz
min, MIN	分钟	min

5. 本书所用缩写一般在第一次出现时,附全名。部分多次出现的缩写举例见表 0.2。

表 0.2

常用缩写	英 文 全 称	中 文 全 称
AAR	Association of American Railroad	北美铁路协会
AREA	American Railway Engineering Association	美国铁路工程协会
ASCE	American Society of Civil Engineering	美国土木工程学会
ASME	American Society of Mechanical Engineering	美国机械工程学会
FRA	Federal Railroad Administration	联邦铁路管理局
ISO	International Standards Organization	国际标准组织
MDOF	Multi-Degree of Freedom	多自由度的
SDOF	Single-Degree of Freedom	单自由度的
PSD	Power Spectra Density	功率谱密度
rms	Root Mean Square	均方根值
TTC	Transportation Test Center	运输试验中心
TTD	Track Train Dynamics	列车/轨道动力学

6. 原书错漏之处已作改正。

译 者
1997 年 3 月

目 录

第1章 动态系统分析

1.1 序 言	(1)
1.2 约束、广义坐标和自由度	(1)
1.3 线性动态系统	(3)
1.4 振动分类	(3)
1.5 线性单自由度(SDOF)系统	(4)
1.6 线性多自由度(MDOF)系统	(11)
1.7 随机振动	(16)
1.8 小 结	(29)
参考文献	(29)
补充参考文献	(29)

第2章 求解动态系统响应的数值积分方法

2.1 序 言	(30)
2.2 显式积分法	(31)
2.3 隐式积分法	(34)
2.4 实例分析	(39)
2.5 小 结	(55)
参考文献	(55)

第3章 铁道车辆模型和轨道几何参数的描述

3.1 序 言	(57)
3.2 数学模型的类型	(57)
3.3 求解方法	(59)
3.4 动态模型	(61)

3.5 铁道车辆性能	(61)
3.6 性能指标	(64)
3.7 轨道几何参数的描述及 FRA 轨道安全标准	(78)
3.8 轨道几何参数的解析表达式	(83)
3.9 小 结	(99)

参考文献	(99)
------------	------

补充参考文献	(100)
--------------	-------

第 4 章 轮—轨滚动接触理论

4.1 序 言	(102)
4.2 蠕 滑	(102)
4.3 蠕滑力	(104)
4.4 轮—轨滚动接触问题	(106)
4.5 轮—轨滚动接触理论的分类	(109)
4.6 轮—轨滚动接触理论	(109)
4.7 小 结	(130)

参考文献	(132)
------------	-------

第 5 章 铁道车辆零部件的模拟

5.1 序 言	(135)
5.2 铁道车辆转向架构造及其悬挂	(135)
5.3 悬挂特性	(141)
5.4 轮对沿直线轨道的运动方程	(144)
5.5 轮对通过半径任意变化曲线的运动方程式	(159)
5.6 转向架模型	(165)
5.7 小 结	(176)

参考文献	(176)
------------	-------

第 6 章 铁道车辆的直线轨道响应

6.1 序 言	(178)
6.2 货车垂向和侧滚动力学模型	(179)
6.3 六轴机车响应模型	(190)

6.4	客车横向响应模型	(211)
6.5	小 结	(226)
	参考文献	(227)
	补充参考文献	(227)
第7章 直线轨道上铁道车辆的横向稳定性		
7.1	序 言	(229)
7.2	横向稳定性	(229)
7.3	货车横向稳定性模型	(230)
7.4	机车横向稳定性模型	(243)
7.5	客车横向稳定性模型	(261)
7.6	小 结	(266)
	参考文献	(266)
	补充参考文献	(267)
第8章 曲线轨道上铁道车辆的响应		
8.1	序 言	(268)
8.2	曲线通过模型的分类	(268)
8.3	曲线通过模型的要素	(269)
8.4	货车曲线通过模型	(270)
8.5	机车/客车曲线通过模型	(294)
8.6	小 结	(335)
	参考文献	(335)
第9章 列车动力学		
9.1	序 言	(337)
9.2	通用术语定义	(337)
9.3	纵向列车动力学基础	(338)
9.4	列车部件及其数学模型	(340)
9.5	列车动力学模型	(347)
9.6	列车动力学模型的应用	(367)

9.7 小 结	(370)
参考文献	(371)
第 10 章 铁道车辆和桥梁之间的相互作用	
10.1 序 言	(372)
10.2 车辆和桁架式桥梁间的相互作用	(372)
10.3 不同来源的桥梁冲击	(389)
10.4 小 结	(391)
参考文献	(391)
第 11 章 铁道车辆系统模型的验证	
11.1 序 言	(393)
11.2 模型验证的必要性	(393)
11.3 模型验证和性能试验	(394)
11.4 模型的种类	(395)
11.5 动态过程和车辆性能	(396)
11.6 验证指标	(397)
11.7 一种时域模型的验证	(400)
11.8 小 结	(405)
参考文献	(406)
补充参考文献	(406)
索 引	(407)

第 1 章 动态系统分析

1.1 序 言

本章简要讨论处理动态系统所用的分析方法。开始部分用于线性单自由度系统的分析,讨论自由振动及强迫振动响应。然后,介绍多自由度系统的分析方法,如特征值问题的求解,多自由度系统响应的模态叠加法等。最后,简要介绍随机振动理论及线性系统在稳态随机激励下响应的计算方法。

1.2 约束、广义坐标和自由度

质点系统的位置称为系统的构形。通常,由于约束的存在并不需要给每个质点标明实际坐标。对于一个动态系统,约束可能存在于系统的周边,也可能存在于系统内部各个质点之间。只给出作用力关系的称为静力学约束,给出位移间的关系的称为运动学约束。在选择描述动态系统的坐标系时,必须考虑这两种不同的约束。由于系统所受的约束而存在的坐标之间的关系称为约束方程式。基于这一定义,可以说,存在一种无约束或独立坐标的系统,它可以用来描述受约束坐标的系统,这在动态系统分析中是经常采用的方法。例如,设有一个用 M 个坐标来描述的系统,如果位移之间存在 R 个约束,则有 R 个坐标可以用其他 $M-R$ 个坐标来表示。设

$$N=M-R, \quad (1.1)$$

则 N 为独立坐标数,所有的力及位移均可定义为这 N 个坐标的函数。能够完全确定一个动态系统构造的独立坐标称为广义坐标。广义坐标可以在不破坏约束条件下任意改变,即是独立的变量。这种系统称为完整系统(Holonomic System)。广义坐标的个数就是

动态系统的自由度。

为了说明受约束的动态系统,现考虑一个刚体,其上一点的 y 方向位移被约束,如图 1.1 所示。

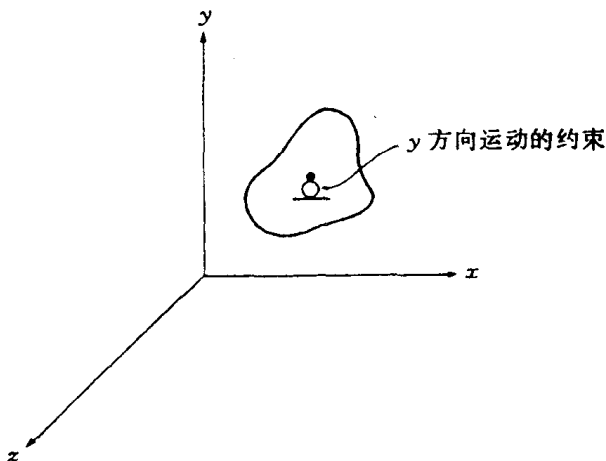


图 1.1 刚体的一般运动(5 个自由度)

在三维空间中,该刚体的运动必须用 5 个坐标来表示,即:沿 x 及 z 轴方向的移动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动。此时,自由度数目为 5。现假设该刚体被进一步约束,使它如图 1.2 所示只能在 x — y 平面内运动。作平面运动的刚体需要 2 个自由度来描述其运动,即沿 x 轴的移动和绕 z 轴的转动。

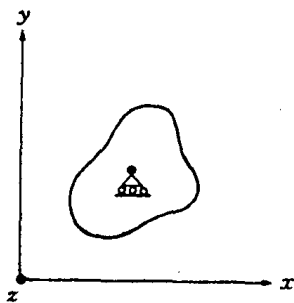


图 1.2 作平面运动的刚体(2 个自由度)

1.3 线性动态系统

前已述及,一个动态系统自由度的数目就是完全描述其运动的独立坐标的个数。离散的动态系统具有有限个自由度,而连续体模型则具有无穷多个自由度。最简单的离散数学模型就是单自由度线性模型。线性模型具有如下优点:

- (1) 其响应与输入成正比;
- (2) 可应用叠加原理;
- (3) 与许多动态系统的特性十分近似;
- (4) 其响应特征可自其方程式的形式得到,而毋需详细求解;
- (5) 通常可以得到封闭形式的解析解;
- (6) 数值求解方法已很成熟;
- (7) 它们是理解更为复杂的非线性系统特性的基础。

应当指出,多数非线性问题不可能得到运动方程的封闭形式的解析解。因此,常用计算机仿真计算来分析响应。计算机仿真中的数值分析技术将在下章讨论。

1.4 振动分类

振动可分为自由、受迫及自激振动三种:

自由振动是没有强迫振动下发生的振动,其阻尼可能有也可能没有。在没有阻尼的条件下,起始条件所具有的机械能全部保留,由于动能和势能之间的持续交替,可使系统的振动永不休止。因为机械系统总是伴随有某种形式的阻尼,所以,这一自由振动的理论只见于天体力学、空间动力学及结构动力学问题,其阻尼极小,故可按非阻尼系统处理。

受迫振动由作用于系统的外力所引起。这时,激励力连续不断地向系统提供能量,以补偿阻尼所耗散的能量。受迫振动可以是确定性的,也可以是随机的。本书所考虑的动态系统运动微分方程式都是确定性的,即参数不是时间的随机变量。但激励力则可能是确定的或随机的力函数。对确定性振动,将来任何指定时刻的振幅和