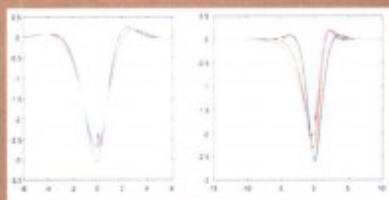
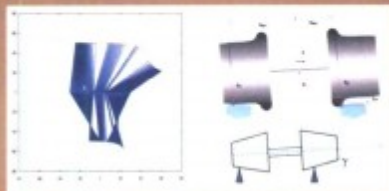
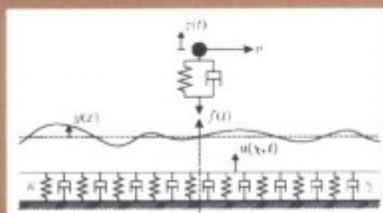
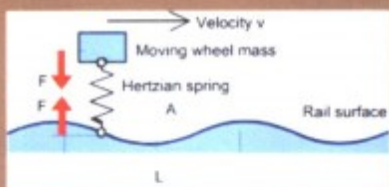


同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助

轨道动力学

练松良 编著



同济大学出版社

ISBN 7-5608-2602-4



9 787560 826028 >

定价 25.00元

同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助

轨道动力学

练松良 编著

同济大学出版社

内 容 简 介

本书首先介绍了各种类型的振动、轨道结构的受力及振动特点,然后对振动信号进行时域和频域分析的方法,将功率谱密度函数转换成时域函数的方法作了介绍。根据国内外近几年对轨道结构力学分析的进展,本书对目前车辆-轨道的动力计算方法作了叙述。轮轨关系是直接影响到车辆运行的平稳性和安全性,对轮轨蠕滑力的计算也是目前轮轨关系的重点之一,本书对此作了详细的介绍。振动和噪声是目前国内外铁路研究的一个重要方向,本书也对轨道交通的振动噪声及减振降噪型轨道结构作了一些介绍。

本书可作为铁道工程专业研究生和大学本科高年级学生的教材,也可作为铁路研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轨道动力学/练松良编著. —上海:同济大学出版社,

2003.10

ISBN 7-5608-2602-4

I. 轨… II. 练… III. 轨道力学:动力学

IV. U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 Q19693 号

轨道动力学

练松良 编著

责任编辑 庞强特 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销

全国各地新华书店

印 刷

苏州望电印刷有限公司印刷

开 本

787mm×1092mm 1/16

印 张

13

字 数

332000

印 数

1—1000

版 次

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

书 号

ISBN 7-5608-2602-4/TU·496

定 价

25.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

为了适应铁路建设现代化发展的要求,在铁路的设计、管理、施工、研究部门越来越需要更多的高层次人才,而高等学校对培养高层次人才更是责无旁贷。目前在道路与铁道工程专业铁道线路专业方向的研究生的轨道力学教学过程中,缺少一本合适的教材,只能使用几本专著,影响了教学效果。作者在近几年的研究生教学过程中,深感有必要编写一本适合铁道线路专业方向的研究生及大学本科高年级学生的教材,以利教学。

轨道结构与其他工程结构物存在较大的差异,主要是轨道结构受到列车随机荷载的作用,而组成轨道结构的材料性能差异也很大,从而使得对轨道结构的受力分析相当复杂。目前随着我国铁路运行车辆的变化、线路结构的改变和列车速度的提高,轮轨之间的振动及受力分析更加复杂。但随着计算机仿真技术的发展,越来越多的车辆-轨道结构、轮轨受力和振动的仿真计算机软件投入使用,为分析轮轨之间的相互作用提供了有力的工具。但对于铁路管理、设计、研究人员来说,在使用这些软件之前,对车辆-轨道、轮轨关系的基本理论的掌握是非常必要的。

在对车辆-轨道结构的动力分析过程中,要涉及随机振动理论、振动信号的时域和频域分析,将轨道随机不平顺功率谱转换为时域函数的计算等。本书只是对这部分主要内容作一般性介绍,如要更详细地掌握振动信号的分析技术,则需要对随机振动、信号处理等有一个系统的学习。

在现代轮轨系统研究中,车辆动力学、轨道动力学是不可分割的两个重要部分,离开任何一部分,则对轮轨系统的研究都是不完整的。在以往的研究中,由于计算技术的限制,往往将这两部分内容分开研究。自20世纪80年代,随着计算机技术的发展,将车辆-轨道系统进行耦合振动分析计算已成为可能。而对车辆-轨道的耦合振动分析与更适合于当代高速、重载铁路的动力分析。

本书在对车辆、轨道的动力方程的建立、轮轨之间蠕滑的计算等都作了介绍,读者在对应用计算机仿真软件计算时,对轮轨关系的理论有一个较为详细的了解,从而有利于对轮轨系统的研究分析。

在荷载作用下,轨道结构的方向、高低、水平、轨距都要发生变化,以往对轨道结构研究较多的只是注意到在垂向荷载作用下轨道的垂向位移,对轨道的纵向、横向、扭转则往往注意不够。轨道结构的纵向受力影响到无缝线路的稳定

性,横向、扭转位移影响轨距的扩大,所有这些都影响到行车的平稳性,严重的情况下,则影响到行车安全。本书对荷载作用下轨道结构几何形位变化的理论计算方法作了些介绍。

在铁路噪声中,轮轨噪声要占综合噪声中较大的比例,降低轮轨噪声则可降低综合噪声的总体水平。轮轨噪声分滚动噪声、冲击噪声和啸叫噪声,每种类型噪声的发生原因也不相同,所以,采取的降噪措施也各不相同。轨道结构的形式及弹性也对轨道结构的振动和噪声产生较大的影响。对于城市轨道交通,一般采用无碴轨道结构形式,所以,对于不同振动和噪声要求的地区,应分别采用不同减振降噪效果的轨道结构,以取得最佳效果。

本书在编写过程中参考了西南交通大学翟婉明教授《车辆-轨道耦合动力学》一书中的内容,在此表示感谢。

编 者

2003年9月23日

于同济大学

目 录

第一章 轨道结构振动的基本特征及受力	(1)
第一节 振动类型	(1)
第二节 轨道结构振动的基本特征	(3)
第三节 轨道结构的作用力	(5)
第二章 随机振动理论在轨道结构分析中的应用	(8)
第一节 随机过程与随机振动	(8)
第二节 随机过程的幅域描述——概率分布	(9)
第三节 随机过程的时域描述——数字特征	(10)
第四节 随机过程的频域描述——频谱分析	(12)
第五节 随机过程的频域描述——功率谱分析	(14)
第六节 轨道不平顺的随机特性及分析	(15)
第七节 轨道局部不平顺	(21)
第八节 轨道不平顺的数值模拟	(23)
第三章 轨道结构振动分析模型及参数计算	(28)
第一节 轮轨相互作用分析的发展过程回顾	(28)
第二节 轮轨冲击三自由度模型的计算	(33)
第三节 Sato 半车模型的分析与计算	(35)
第四节 轨道结构刚度值的理论计算	(38)
第五节 集总参数的计算	(48)
第六节 参数辨识法计算轨道结构振动参数	(51)
第四章 车辆-轨道垂向耦合动力学	(54)
第一节 车辆垂向振动的微分方程	(56)
第二节 轨道结构振动微分方程	(59)
第三节 车辆-轨道垂向耦合关系	(62)
第四节 车辆-轨道垂向振动分析程序及计算参数	(62)
第五章 机车车辆-轨道横向耦合动力学	(65)
第一节 机车车辆曲线通过的摩擦中心法和蠕滑中心法	(65)
第二节 货车转向架稳态通过曲线的力学模型	(70)
第三节 机车横向振动动力模型	(75)
第四节 客车横向振动动力模型	(87)
第五节 C62A 货车横向振动动力模型	(92)

第六节 轨道横向振动模型·····	(102)
第六章 轮轨接触面的受力及耦合模型·····	(105)
第一节 轮轨接触几何参数的计算·····	(105)
第二节 轮轨接触面上法向压力和蠕滑力的计算·····	(108)
第三节 轮轨接触斑面积及长、短轴的计算·····	(118)
第四节 轮轨两点接触时轮缘导向力的处理·····	(119)
第五节 轮轨系统的垂向扰动模型·····	(121)
第七章 钢轨纵向受力及扭转分析·····	(128)
第一节 轨道结构纵向受力的分析计算·····	(128)
第二节 荷载作用下轨距扩大的理论分析·····	(132)
第八章 轨道振动测试与分析·····	(143)
第一节 落轴试验原理·····	(143)
第二节 落轴试验评价轨道结构振动性能·····	(144)
第三节 利用落轴试验测试轨道结构参数·····	(148)
第九章 轨道结构的振动与噪声·····	(152)
第一节 振动的产生及评价标准·····	(152)
第二节 噪声的产生及评价标准·····	(155)
第三节 铁路噪声的组成·····	(159)
第四节 轮轨噪声·····	(162)
第五节 减振降噪措施·····	(167)
第十章 减振降噪型无碴轨道结构介绍·····	(170)
第一节 无碴轨道结构的振动和噪声特点·····	(170)
第二节 轨道结构部件与一般减振降噪措施·····	(172)
第三节 城市轨道交通轨道结构钢轨扣件的选择·····	(172)
第四节 弹性支承块(枕)轨道结构(LVT)·····	(179)
第五节 浮置板式轨道结构·····	(183)
第六节 其他减振降噪型轨道结构·····	(187)
附录 1 最小二乘法参数辨识算例·····	(191)
附录 2 参数辨识最小二乘法计算程序·····	(192)
参考文献·····	(195)

第一章 轨道结构振动的基本特征及受力

任何工程结构物受到外荷载作用时都会产生振动。如桥梁、高层建筑物等受到风荷载时会产生振动；在地震时，这些建筑物也会产生振动。所以振动是一种无所不在的自然现象。研究工程结构物的振动特性，对工程结构的振动进行控制，从而有效地延长结构物的使用寿命。但不同的结构物，其振动形态也各不相同。轨道结构是一种由不同性能材料所组成的工程结构物。当列车荷载作用在轨道结构上时，也会产生振动。但由于轨道结构参数和材料的随机性，所以轨道结构产生的振动也是一种复杂的随机振动。当轨道结构特性和几何形位、机车车辆运行工况发生变化时，轮轨之间的动力作用相应发生变化，轨道结构的受力也随之改变，于是直接影响到轨道结构的使用寿命。本章就轨道结构振动的一些基本特性和轨道结构的受力作基本阐述。

第一节 振动类型

一、确定性振动

振动是物体机械运动的一种特殊形式。振动常用运动的时间历程来描述，或者用位移、速度或加速度的时间函数来表达。例如，简谐振动的位移时间历程可用下式表示：

$$y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式中 y_0 ——位移的幅值；
 ω ——振动圆频率；
 t ——时间；
 φ ——初相角。

显然，在 y_0 、 ω 和 φ 一定时，简谐振动是一个确定性的振动，对在任何时刻 t 的振动位移 $y(t)$ 的数值可以精确地计算出来。所以，描述简谐振动所用的是确定性数据。确定性振动又可以分为以下两种：周期性振动和非周期性振动。

（一）周期性振动

周期性振动，除上述所讲的简谐振动以外，还有复杂的周期振动。图 1-1(a)和(b)分别表示上述两者的振动形式。

从图中可以看出，简谐振动一般只有一个振动频率，而复杂周期振动虽然其运动方式是周期的，但其运动也较难用一个简单的函数加以描述。

（二）非周期性振动

非周期性振动包括准周期振动和瞬态振动。所谓准周期振动是由一些不同频率、不同振动幅值的简谐振动合成的振动。这一点与复杂周期振动类似，但频率成分更复杂，如图

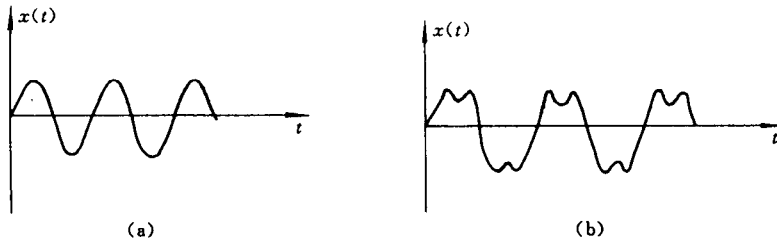


图 1-1 周期性振动
(a) 简谐振动; (b) 复杂周期振动

1-2(a)所示。但是准周期振动没有周期性,组成它的简谐分量中总会有一个分量与另一个分量的频率之比为无理数,而复杂周期振动的简谐分量与另一个分量中任何两个分量的频率比都是有理数,这是准周期与复杂周期振动不同之点。非周期振动中的瞬态振动其时间函数为各种脉冲函数或衰减函数,例如,在轨道结构中的有阻尼冲击振动就是属于瞬态振动,如图 1-2(b)所示。

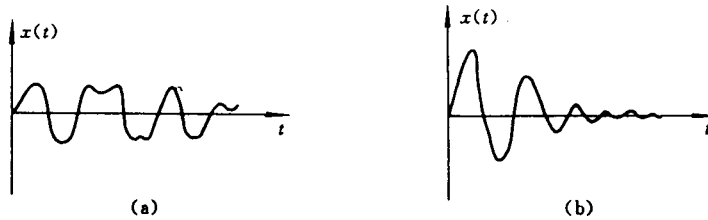


图 1-2 非周期振动
(a) 准周期振动; (b) 瞬态振动

二、非确定性振动

随机振动是一种非确定性振动。当系统作随机振动时,事先不可能确定系统中某观测点在某时刻的位置以及有关的振幅、频率或相位等参数的瞬时值,即不能用确定函数来描述这种振动。当外部激励是随机的情况下,它就不能用一个确定的函数来描述可能会发生的振动波形,也就是对振动系统的激励,事先不能用确定函数描述。因此,振动响应也就不能用确定函数来描述。

随机振动虽然具有不确定性,但却有一定的统计规律。这种统计规律可在一定条件下多次重复在观测或测试的结果中呈现出来。随机振动除了因外部激励随机变化而引起外,振动系统本身的参数随机变化也会引起随机振动。随机振动的时间历程如图 1-3 所示。

按照随机振动的特征,随机振动可以有以下几种分类法:

1. 按振动激励和振动系统参数的特性可分为:
 - (1) 随机激励引起的随机振动;
 - (2) 系统参数的随机性引起的随机振动;
 - (3) 随机激励和系统参数的随机性共同引起的随机振动。

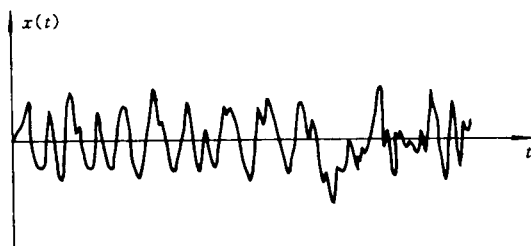


图 1-3 随机振动时间历程图

2. 按激励类型可分为：

- (1) 随机自由振动；
- (2) 随机受迫振动。

3. 按系统自由度可分为：

- (1) 单自由度随机振动；
- (2) 多自由度随机振动；
- (3) 无限自由度随机振动。

4. 按微分方程的特点可分为：

- (1) 线性随机振动；
- (2) 非线性随机振动。

5. 按随机振动频率宽窄可分为：

- (1) 宽频随机振动；
- (2) 窄频随机振动。

6. 按振动特征随时间变化情况可分为：

- (1) 平稳随机振动；
- (2) 非平稳随机振动。

但是,在有些场合,一种振动是属于确定性振动还是属于随机振动很难区分。因为确定性振动也难免有意外因素的影响,使得振动有一定的随机性。判别振动是随机的还是确定性的,通常以在相同条件下是否产生相同的振动结果作为依据。

第二节 轨道结构振动的基本特征

一、外部激励的特征

轨道结构的振动现象十分复杂,从振动方向可以分为:垂向振动、横向振动和纵向振动,并且钢轨还有扭转振动,轨枕还有挠曲振动。在这些振动形式中,垂向振动是引起轨道破坏的主要因素,因此我们常以垂向振动作为主要的研究对象。随着列车速度的提高,为保证行车的平稳性和安全性,对轨道结构的动态几何形位要求也越来越高,所以对轨道结构的横向振动和扭转振动的研究也越来越多。

轨道结构外部激励特性取决于轮轨间的动力作用的特性。当机车车辆通过轨道时,轨道结构本身的缺陷成了机车车辆产生垂向振动的激振源。激振源按其性质来分,可以有以下三种:

1. 个别突然的激振源:当轮对通过轨道上的局部不均匀下沉或道岔辙叉部分,激起机车车辆的垂向振动,与轨道结构垂向振动有关的是簧下部分的垂向振动。

2. 周期性的激振源:钢轨接头处的下沉、车轮面擦伤、轮重不均衡和轮轴偏心、车中装有发电机,这些都是引起机车车辆垂向振动的激振源。其中钢轨接头是最主要的振源。随着无缝线路的逐步铺设,钢轨接头数量大为减少,但并没有完全消灭,因而钢轨接头可以作为一个个别突然的激振源。

3. 随机性的激振源:钢轨顶面的不均匀磨耗与道床和路基永久变形形成的轨道几何不平顺以及因钢轨基础弹性不均匀形成的轨道动力不平顺引起机车车辆的垂向振动。其中轨道的动力不平顺是激起机车车辆振动的主要原因。它不能用一个确定的函数来表示,也不能用表达简谐振动的幅值和频率来描述,而只能用表征随机过程的统计特性来描述。

从上述分析可知,轮轨间的动力作用特性决定于激振源的特性。如果把轨道结构的外部激励用力的形式来表示,则可分为三种形式的作用力:周期性作用力、随机性作用力和冲击性作用力。

二、轨道结构振动时间历程的特性

由于上述激振源并非单独存在于轨道上,因此我们实测得到的振动波形就很难区分是由哪一种激振源产生的,于是我们仅用实验室用落轴激振轨道结构而取得的钢轨、轨枕和道床振动加速度的时间历程特性来说明一下钢轨结构的振动特性。如图 1-4 所示。图 1-4(a),(b),(c)中分别表示钢轨、轨枕和道床的振动加速度时间历程的样本。将图 1-4 与图 1-2(b)比较可以看出:

1. 钢轨、轨枕和道床振动加速度时间历程与瞬态振动非常相似,只是钢轨、轨枕的振幅的衰减比较慢而已(10ms 以上);

2. 根据频谱分析可知,钢轨、轨枕和道床振动加速度含有丰富的频率结构,一般的范围在 0~1000Hz,主频 800Hz 左右。振动主频与振动参数的大小有关;振动加速度随频率的提高而增大,而位移的幅值随着频率的增加而减小。钢轨的振动加速度主要集中在 40~800Hz 范围内。

3. 由于轨道结构是一种不完整的松散结构,即使在实验室内进行测试,也很难保持在相同条件下得到相同的测试数据。因此我们对轨道结构的振动进行理论分析时,当外部激励的形式是确定性的,我们可按确定性的振动来分析,否则可按随机振动来分析。

4. 现场实测轨道结构的振动更加复杂,一是轨道结构振动的激扰函数(也即车轮和轨面不平顺)是随机的;二是轨道结构形式,如扣件扣压力的大小,道床的密实度等都是随机函数。所有这些都决定了轨道结构的振动是一种随机振动。

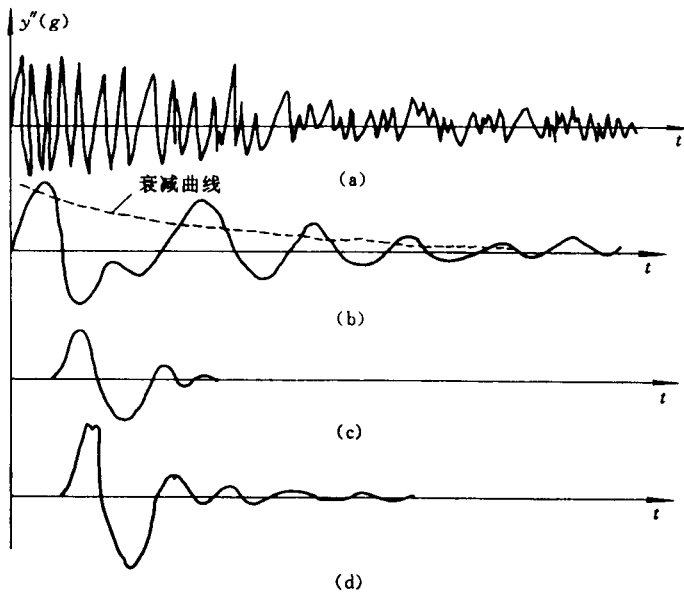


图 1-4 振动加速度时间历程曲线

(a) 钢轨振动加速度波形曲线; (b) 轨枕振动加速度波形曲线
(c) 轨枕底(道床顶面)振动加速度波形曲线; (d) 道床振动加速度波形曲线

三、轨道结构振动分析的内容

1. 轨道结构动力响应的计算。包括以下三项内容,轨道结构外部激励形式的确定;轨道结构振动参数的选定;计算模型的建立及动力响应的计算。

2. 动力响应的现场直接测定。由于轨道结构外部激励比较复杂,因此我们往往依赖于动力响应的现场直接测定,并根据测得的动力响应来分析轨道结构振动的特性。但是,这种方法工作量比较大,测试数据的离散性也比较大,因此,我们常常采用理论分析和现场测定相结合的方法。首先,按某种计算模型计算动力响应,然后进行少量的现场测定,根据现场测定的结果修改模型和振动参数,并计算动力响应。

3. 调整某些振动参数改善动力响应。例如,我们可以局部地调整轨下弹性垫层的弹簧刚度来改善轨道结构的动力响应。

4. 减少车辆对轨道的破坏作用。对机车车辆的簧下质量等参数提出要求和限制,以减少车辆对轨道的破坏作用。

轨道结构的振动测试与分析详见第八章,本章不再赘述。

第三节 轨道结构的作用力^[1]

轨道上作用力的大小是引起轨道结构振动强度大小的主要原因之一,也是引起轨道几

何形位变化、轨道部件损伤的重要原因。为了减小轨道结构的振动,控制轨道结构受力的大小是有效的方法,但轨道结构受力的大小要受到诸多因素的影响,在某些条件下很难对轨道结构的受力大小进行控制。

行驶中的机车车辆作用于轨道的力是非常复杂的。这些力可分为竖直力、横向力和纵向力。这些力是由于机车车辆与轨道之间相互作用引起的或由于温度变化引起的。在这些力的作用下,轨道结构要产生各种各样的应力和变形。要对轨道结构进行振动分析,则必须先对作用于轨道结构上的力进行分析。

一、竖直力

竖直力的主要组成部分是机车车辆的轮载。一般考虑左、右轨的静轮载对称,且垂直于水平面,其数值的大小可直接从各型机车车辆构造的性能表中查取。当列车以一定速度行驶于轨道上时,机车车辆实际作用于轨道上的轮载大小有时大于静轮载,有时小于静轮载,称为动轮载。一般将动轮载和静轮载之差称为动力附加值。动轮载的大小随机车车辆的运行速度大小和轨道结构类型和状态的改变而变化,所以影响动轮载的因素十分复杂,变化规则也十分复杂。一般圆顺车轮在轨道上行驶时,所引起的动力附加值不会超过静轮载的20%。但在钢轨接头、轨面单独不平顺、车轮扁疤、车轮偏心等引起的轮轨冲击,动力附加值可超过轮载的几倍。

属于机车车辆构造及运行状态引起轮载动力附加值变化的原因有:

1. 车轮踏面因制动或其他原因引起的擦伤而形成的扁疤。有扁疤的车辆每转动一次对钢轨撞击一次;
2. 由于偏心车轮在运行过程中产生动力不平衡,造成轮轨之间附加动力轮载增大。

属于轨道构造及其状态引起轮载动力附加值变化的原因有:

1. 机车车辆通过曲线轨道时,因未被平衡的外轨超高而产生的轮载偏载,使一股钢轨上的轮载增大,另一股钢轨上的轮载减小;
2. 机车车辆通过钢轨接头时,由于轨缝、错牙和折角导致轮轨冲击所产生的轮轨附加动力荷载;
3. 车轮通过存在擦伤等单独不平顺的轨面时,所产生的轮轨冲击与车轮踏面存在扁疤的情况完全一样,使轮轨附加动力荷载增大;
4. 车轮通过存在周期不平顺的轨面时,可能引起车辆簧上和簧下结构产生复杂的空间振动,从而导致轮轨附加动力荷载增大;

属于机车车辆在轨道上运动形态方面的原因有:

1. 机车车辆在运行时产生蛇行运动,使得一轮对两轮的滚动圆半径不同,从而引起轮载偏载;
2. 机车车辆通过曲线轨道时,由于离心力的作用,使车辆重心外移,导致车辆偏载,增大了附加动力荷载;
3. 列车牵引和制动时引起轴重转移,使各轴的荷载产生变化。

上述各种动力荷载,即垂直于轨道平面的竖直荷载或轮载,在机车车辆运行过程中是时

刻变化着的。它有时产生,有时消失,所以附加动力荷载有时为正,有时为负,是一种高度随机的动力荷载。这些荷载中,有些可以利用公式精确计算(如未被平衡引起的偏载),有些只能通过现场实测得到,并通过数理统计的方法加以估算。最后,根据各种荷载的情况,加以组合,得出作用于轨道上的最不利的动力荷载。

二、横向水平力

在轮轨接触点上,除了竖直荷载外,同时还存在有横向荷载。作用在钢轨上的横向力分两部分,一是轨顶面的蠕滑力,二是轮缘导向力(在第六章中有详细计算,此处只作一般性叙述),产生横向力的原因有:

1. 机车车辆在直线轨道运行时,由于蛇行运动所产生的周期性横向荷载;
2. 机车车辆运行在方向不良的轨道上时(如通过曲线硬弯,道岔上的尖轨、护轨和翼轨等),轮缘冲击钢轨,造成轮轨之间的横向冲击荷载;
3. 机车车辆通过曲线轨道时的导向力和未被平衡的离心力等。

与轮轨之间的竖向力一样,轮轨之间横向力的计算有些较为简单,如未被平衡的离心力;有些较为复杂,如轨顶面的横向蠕滑力。目前一般在机车车辆运行模拟计算时,在程序中都引用 J. J. Kalker 理论计算轮轨之间的蠕滑力。

三、纵向水平力

目前,一般对轨道结构所受的纵向力重视不够,当要考虑无缝线路稳定性时,钢轨的纵向力才会充分引起人们的注意。在钢轨中产生纵向力的原因有:

1. 当钢轨上作用轮载时,钢轨就会产生挠曲,轨底的纤维被拉长,轨头的纤维被压缩。由于车轮压住钢轨,所以当轮子滚动时,钢轨就顺着列车行车方向爬行。当钢轨被中间扣件扣住时,钢轨不能产生爬行,于是就产生纵向爬行力;

2. 当列车在坡道上行驶时,就有一个重力的纵向分力作用在钢轨上,这一纵向分力的大小与线路坡度的大小密切相关;

3. 列车在牵引或制动状态时,就有一纵向力作用在钢轨上。在一般情况下,列车制动在钢轨中产生的纵向力要大于列车牵引时作用在钢轨上的纵向力。制动力大小可根据闸瓦压力和摩擦系数的乘积计算。但由于机车车辆构造的不同,制动系统的不同,制动过程中列车速度的变化等等,使得制动力的计算也十分繁杂。但在钢轨中的最大纵向应力可达 9.8MPa;

4. 当列车通过曲线时,转向架的转向使得车轮踏面与钢轨顶面之间产生蠕滑力。蠕滑力也可分解成纵向和横向蠕滑力;

5. 处于约束状态的无缝线路长钢轨,当轨温发生变化时,钢轨不能产生自由的伸长或缩短,于是在长钢轨中产生强大的温度力。温度力的大小可根据无缝线路的锁定轨温和当时轨温进行精确计算,但到目前为止,还无法精确测量长轨条中的温度力。

第二章 随机振动理论在轨道结构分析中的应用

第一节 随机过程与随机振动

一、随机过程

随机变量是概率论中最基本的概念,它表示随机试验中各种结果的变量。其特点是在相同的条件下,每次试验的结果可能是事先未知的,然而却是唯一确定的值。必须指出,随机变量不是指某一个确定的值,而是指它所有可能值的集合。

若随机变量记为 X ,其可能值记为 x_i ,而 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示所有可能值的集合。则它们之间的关系为: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。但是,在自然界经常遇到更为复杂的现象,此时的随机现象依赖于时间或其他自变量。如精确测量 n 根长度为 L 绳子的直径 d ,则可得到一组随机变化的函数 $d_1(x), d_2(x), \dots, d_n(x)$ 。其中 x 是从绳子首端算起的距离。对于某个确定的 x 值 x_k ,其相应的 $d_1(x_k), d_2(x_k), \dots, d_n(x_k)$ 则是一个随机变量。若 x 连续变动,则可得到连续随机变化的函数 $D(x)$ 。

在相同的条件下,每次试验的结果可能取某种事先未知的、但是唯一确定形式的函数,则称为随机过程,亦称随机函数。相应地,每一次试验所得到的具体函数称为样本函数,亦称随机过程的子样。随机过程不是指某一个具体的函数,而是指这些样本函数的集合。用 $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ 表示这些样本函数的集合。

随机过程和随机变量有密切的联系。当固定自变量于某一个数值时,随机过程就变为随机变量。如较为稠密地依次确定自变量的值,便得到一个随机变量系。这样就可以用这一随机变量系来代替该随机过程。因此,随机变量的有关内容和方法可以作为研究随机过程的基础。

二、随机振动特征

随机振动,是用当代先进的数学工具——随机过程来处理随机振动问题的一门学科。随机振动是普遍存在的自然现象,如行驶中车辆的颠簸、海浪对航行船舶冲击引起的颠簸、大气湍流引起飞机机翼的振动、地震引起的大地振动、风荷载引起的建筑物的振动等等。随机振动无法用一个确定性的函数加以描述。也即无法预测在记录时刻 Δt 之外的任一时刻的函数值。在整个振动过程中,任意取出两个相等时间间隔所记录的图像来进行比较,它们绝不会是完全相同的,即记录的不可重复性。所以,随机振动的第一特征是不可重复性与不可预测性。

但是这并不意味着这种振动毫无规律,更不是这种振动无法描述。我们借助于统计的概念,根据在时间间隔 Δt 上记录的 $Y(t)$ 的特征,对整个振动过程 $Y(t)$ 的基本特性作出比较

精确的描述。也就是说,这种振动具有一定的统计规律。所以,随机振动的第二特征就是可用随机过程理论加以描述。

根据随机振动的上述特征,可以来考察各种实际系统的振动,决定此振动是确定性振动,还是随机振动。但是,不要认为凡是波形复杂的振动就是随机振动。随机振动是复杂的,然而复杂并不等于随机。随机是“概率”的意思,而不是复杂的意思。

在工程中,一个具体系统的振动往往是很复杂的,它同时受诸多因素的影响。在这些影响因素中,有些是确定的,有些是随机的。因此,一切实际系统的振动都具有一定的随机性,只是当对问题解答的精度要求不高时,可以略去次要的随机因素的影响,把问题简化为确定性振动。随机振动的统计规律性可用随机过程来描述,也即表现为随机过程的振动现象,称为随机振动。所以,随机过程是随机振动的理论基础,学习随机振动,则必须掌握随机过程理论。

对于一个以时间 t 为参变量的随机过程,通常可以从以下三个方面进行描述。

- (1) 幅域描述——描述随机过程在各个时刻状态的统计特征,即概率分布;
- (2) 时域描述——描述随机过程变化的平均性质及其在两个不同时刻状态的相互联系的概率特性,通常称为相关分析。
- (3) 频域描述——描述随机过程的频率结构,以揭示过程的频率成分,通常称为频谱分析。

第二节 随机过程的幅域描述——概率分布

一、随机过程统计特性的描述——概率分布

随机过程每一固定时刻上的值是个随机变量。如果我们将随机过程 $Y(t)$ 在时间 t 轴上按一定的间隔取值,如图 2-1,便得到一系列的随机变量: $Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n), t_n \in T$ 。因此,可以将随机过程 $Y(t)$ 近似地看作这些随机变量的组合,即

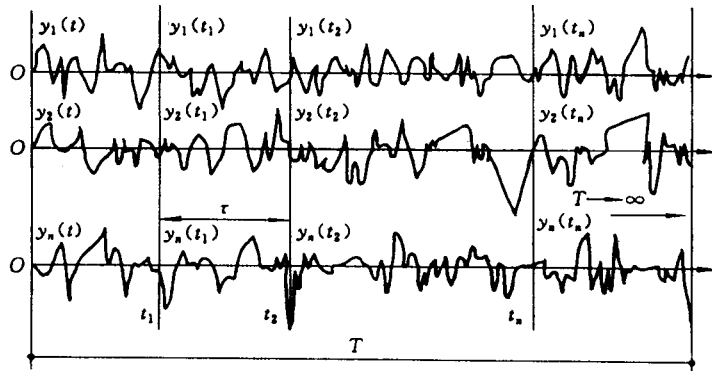


图 2-1 随机过程样本

$$Y(t) = (Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n)) \quad (2-1)$$