

江苏师范大学博士学位教师科研支持项目（项目号：11XLR17）

# 带式输送机 柔性多体动力学分析方法

王繁生 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏师范大学博士学位教师科研支持项目(项目号:11XLR17)

# 带式输送机柔性多体动力学分析方法

王繁生 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统地论述了带式输送机柔性多体动力学分析方法。第1章简要介绍了带式输送机工作原理、特点、动力学分析方法的研究现状和发展方向及本书的主要研究内容;第2章介绍了带式输送机动力学分析研究所涉及的数学及力学的基础知识;第3章介绍了有限刚体元法建立输送带柔性多体动力学方程的方法和步骤,论述了基于绝对坐标的有限刚体元法的输送带柔性多体动力学建模问题;第4章论述了多体动力学中关于接触碰撞问题的建模理论和方法,建立了带式输送机系统的多体接触耦合动力学方程;第5章论述了基于边界元离散的输送带压陷阻力计算机分析方法,并对压陷阻力进行了仿真研究;第6章论述了基于绝对坐标有限刚体法的带式输送机三维实体建模的实现方法。

本书可作为研究生教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

带式输送机柔性多体动力学分析方法/王繁生著.

徐州:中国矿业大学出版社,2013.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1975 - 6

I. ①带… II. ①王… III. ①带式输送机—多  
体动力学—分析方法 IV. ①TH222

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第187662号

- 书 名 带式输送机柔性多体动力学分析方法  
著 者 王繁生  
责任编辑 付继娟 张 岩  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 179千字  
版次印次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷  
定 价 32.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

带式输送机是目前用于中、远距离运输散状物料的重要设备之一,由于其具有高速大运量、自动连续性的优点,所以自 18 世纪末被发明以后,很快就成为输送谷物、煤炭及铁矿石的主要设备。经过两百多年的发展,到现在已广泛应用于煤炭、矿山、粮食、化工、电力、冶金和港口等许多生产领域。随着我国国民经济的高速发展,作为能源和资源工业最重要输送设备之一的带式输送机的应用已越来越广泛。据相关统计,我国煤炭系统现有带式输送机约 120 万台,约占全国带式输送机总量的 60%。高速、长距离是当今带式输送机的主要发展方向,并已成为带式输送机的设计和开发的主流。然而,随着带式输送机运行速度的不断提高,单机长度的不断增加,原来在低速、短距离带式输送机设计中并不显得十分重要的动态特性开始表现得非常突出,因此对带式输送机动态特性的研究成为其设计和开发的核心问题之一。

随着全球经济的增长,带式输送机技术已成为当代科学技术发展的前沿之一。近几十年来,国外投入了大量的物力和财

力进行研究并取得了一定的成果。目前,美国、澳大利亚、荷兰等国家在带式输送机动态特性研究方面处于国际领先,它们各自都开发了动力学分析软件,并在高速长距离带式输送机的设计中得到了应用,取得了很好的效果。我国对带式输送机动态特性的研究起步较晚。近几十年来,国内学者对带式输送机动态分析的研究给予了极大的热情,许多高校和科研机构进行了大量的基础研究工作,并取得了丰富的成果,但我国带式输送机的研究、设计和开发水平与国际领先水平还有不小的差距,急需开展这一方面的理论与应用研究。

本书将重点研究基于柔性多体动力学理论的带式输送机系统多体动力学建模方法。通过研究,以期建立一种更为有效的带式输送机动态分析模型和分析方法,为带式输送机动态特性分析和性能预测进行一些有益的探索,对带式输送机动态仿真技术具有十分重要的工程应用价值和现实意义。

作者在写作过程中参阅了大量的国内外有关文献,在此向这些文献的作者致谢。本书的研究工作得到了江苏师范大学博士学位教师科研支持项目的资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

著 者

2013年6月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 带式输送机概述 .....	1
1.2 带式输送机动力学分析方法 .....	3
1.3 国内外研究现状 .....	5
1.4 本书的主要研究内容 .....	16
<b>2 多体系统动力学建模理论</b> .....	18
2.1 引言 .....	18
2.2 多体系统动力学发展综述 .....	19
2.3 多体系统拓扑构型的数学描述 .....	21
2.4 多体系统参考坐标系和一致变换矩阵 .....	24
2.5 多体系统运动学 .....	31
2.6 多体系统动力学 .....	34
2.7 本章小结 .....	37

<b>3 基于多体理论的输送带动力学模型</b> .....	39
3.1 引言.....	39
3.2 有限刚体元方法.....	41
3.3 输送带的有限刚体元模型.....	42
3.4 改进的有限刚体元法.....	69
3.5 输送带平面运动动力学方程.....	81
3.6 本章小结.....	89
<b>4 带式输送机系统多体接触耦合动力学模型</b> .....	91
4.1 引言.....	91
4.2 多体系统接触碰撞动力学建模理论.....	92
4.3 输送带与滚筒的多体接触动力学模型.....	96
4.4 带式输送机系统的多体接触耦合动力学方程 ...	102
4.5 接触碰撞引起的变拓扑问题 .....	105
4.6 本章小结 .....	107
<b>5 压陷阻力分析方法研究</b> .....	108
5.1 引言 .....	108
5.2 压陷阻力研究概况 .....	109
5.3 黏弹性材料的本构方程 .....	111
5.4 压陷阻力的理论分析 .....	113
5.5 压陷阻力的二维黏弹性模型及仿真分析方法研究...	119

## 目 录

---

5.6 本章小结 .....	156
<b>6 带式输送机动态分析模型验证和仿真研究 .....</b>	<b>158</b>
6.1 带式输送机系统动力学仿真模型 .....	158
6.2 仿真模型的验证 .....	168
6.3 带式输送机系统动态特性的仿真研究 .....	171
6.4 本章小结 .....	180
附录 .....	181
参考文献 .....	192



# 1 绪 论

## 1.1 带式输送机概述

带式输送机是以柔性输送带牵引和载运物料连续输送设备,其结构如图 1-1 所示,主要由驱动装置、传动滚筒、输送带、拉紧装置、托辊、改向滚筒、机架及其他附属装置等部分组成。工作原理是将柔性输送带按特定方式绕在传动滚筒与改向滚筒

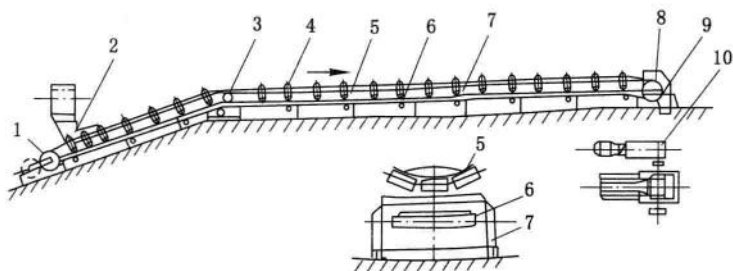


图 1-1 带式输送机

- 1—拉紧装置;2—装载装置;3—改向滚筒;4—上托辊;  
5—输送带;6—下托辊;7—机架;8—传动滚筒;  
9—清扫装置;10—驱动装置

之间,由拉紧装置张紧,传动滚筒摩擦驱动,牵引输送带作连续循环运行。工作时物料随输送带一起移动,从而实现长距离输送。

带式输送机的主要发展趋势是单机越来越长,目前国外单机长度最长的带式输送机是澳大利亚铝矾土有限公司博丁顿矿装备的 30.4 km 带式输送机,津巴布韦钢铁公司也装备有一条单机长度为 15.6 km 的带式输送机,澳大利亚 Channar 铁矿的带式输送机系统由一条 10.3 km 长的越野带式输送机和一条 10.1 km 长的直线带式输送机组成。高速长距离带式输送机与传统的运输系统相比,具有明显的优点:

(1) 运输成本低,经济性好。国外专家组曾对目前世界上最长的带式输送机系统之一的西班牙西撒哈拉带式输送机进行过经济性分析,结论是这套由分别长 6.9~11.8 km 的 11 条带式输送机组成的、总长 100 km 的运输系统是比较管道输送、汽车运输和铁路运输都经济的最佳运输方案。此研究将长距离带式输送机与其他运输方式进行了比较,表明:长距离带式输送机运输成本比普通带式输送机低约 8%,仅相当于汽车运输成本的 23.4%。

(2) 可靠性高,运行平稳。现代长距离带式输送机由于单机长度的不断提高,同一输送系统输送机台数相应减少,整个系统的故障概率随之降低,同时物料本身随带一同运行,运输途中破碎少、磨损小。

(3) 输送距离长,运输能力大。德国设计的从荷兰鹿特丹

到德国杜伊斯堡的输送机系统由 17 条带式输送机组成,全长达 206 km,该系统设计年输送铁矿石 3 600 万吨。目前国内单机长度最长的带式输送机是江苏景阳水泥厂的一条单机长度达 16 km 的带式输送机。2002 年,我国天津港的一条输送煤炭的带式输送机单机长度达到 8.9 km,运量可达 6 600 t/h。

(4) 节能环保。由于输送机属于连续输送设备,因此启动后的绝大部分时间处于满负荷工作状态,运行效率高。带式输送机运行过程中相对能耗不高,其用电量仅为刮板输送机的 1/3~1/5。输送机头部配备的除尘设备可清物料转运所产生的粉尘,有效降低了可能对环境造成的粉尘污染。输送过程中运转平稳,噪音污染小。因此,在全球受能源危机和环境污染严重困扰的今天,长距离带式输送机无疑将是输送散状物料最佳的节能环保设备。

正是基于带式输送机的以上特点,它已成为目前我国多领域特别是煤炭领域的主要运输设备。近年来,随着我国煤炭采掘业的高速发展,对煤炭输送的要求也越来越高,作为煤炭运输主要设备的带式输送机正迅速向高速、长距离和大功率的方向发展,并已成为国内带式输送机研究和开发的重点。

### 1.2 带式输送机动力学分析方法

我国对带式输送机动态特性的研究起步较晚,近几十年来,国内学者对带式输送机动态分析的研究给予了极大的热情,许多高校和科研机构进行了大量的基础研究工作,并取得了丰富

的成果,但与国外的研究相比还有一定的差距。国外的文献将运行速度为  $10\sim 20\text{ m/s}$  的带式输送机定义为高速带式输送机,并对高带速在技术上的可行性进行了论证。德国带式输送机最高运行速度已超过  $15\text{ m/s}$ ,我国带式输送机通常的运行速度为  $2\sim 4\text{ m/s}$ ,最高速度  $5.6\text{ m/s}$ ,说明我国带式输送机的研究、设计和开发水平与国际领先水平还有不小的差距,急需开展这一方面的理论与应用研究。

带式输送机动力学分析模型是其动态特性研究的基础和关键。目前,国内外建立带式输送机动力学分析模型的主要方法包括有限元方法和多体动力学方法。有限元方法在带式输送机零部件,特别是输送带的振动分析中得到了广泛的应用,其中包括早期的输送带纵向振动一维有限元分析模型,以及输送带纵、横向振动二维杆、梁单元混合有限元模型。可以说,有限元方法在输送带动态特性分析方面得到了成功的应用。

尽管如此,在用有限元方法对带式输送机系统进行动力学建模分析时仍存在以下不足:

(1) 输送带的二维有限元模型过于复杂,在实际的应用中,从理论建模到计算机数值分析方面都面临着很大的困难。

(2) 现有的带式输送机系统有限元分析模型对输送带非线性问题考虑得不是很充分,从多体动力学分析的角度看,输送带在工作中存在大位移、大变形和黏弹性的耦合,属于比较复杂的非线性问题,应在分析模型中给予足够的重视。

(3) 现有的带式输送机系统有限元分析模型中,对输送带

与滚筒之间接触碰撞问题的研究不是很充分,而这一问题属多体动力学中的多体接触碰撞问题,是带式输送机仿真分析中不可回避的一个难点问题。

(4) 就其本质而言,有限元方法更擅长结构动力学分析,因此,基于有限元方法的各种输送带动力学模型实质上仍局限于机械零部件层面的动态性能(主要是输送带的纵、横向振动特性)的分析,而面向带式输送机系统层面的分析模型,则须通过多体系统动力学理论来建立。

从多体动力学理论分析来看,带式输送机属于刚柔混合多体系统,其多体动力学模型的建立应基于柔性多体理论。因此,建立输送带的柔性多体动力学模型,进而在此基础上形成带式输送机系统的刚柔混合多体动力学模型,是解决带式输送机系统层面动力学分析与仿真的有效途径,同时,也是建立带式输送机虚拟样机的基础。

### 1.3 国内外研究现状

#### 1.3.1 输送带的黏弹性模型

在带式输送机出现以来长达 200 多年的历史中,经历了由天然材料输送带构成的短距离系统向由人造复合材料输送带构成的长距离系统发展的过程。目前,带式输送机所用输送带由带芯(骨架层)和覆盖层组成。带芯主要由各种织物或钢丝绳构成。它们是输送带的骨架层,几乎承受输送带工作时的全部负荷。输送带覆盖层材料的主要成分各种橡胶和塑料,其力学

特性为黏弹性,对输送带动态特性有明显的影响。

早期的带式输送机,由于运距都不大,所以在研究中一般不考虑输送带材料的黏弹性对系统动态特性的影响,因此,输送带常被简化为理想刚体或弹性体模型[图 1-2(a)]。

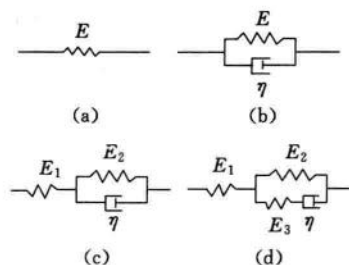


图 1-2 输送带黏弹性力学模型

随着输送带逐渐加长,材料的黏弹性对系统动态性能的影响变得越来越显著。1962年,德国汉诺威工业大学的 Matling 和 Vierling 对输送带的黏弹性进行了研究,并将其首次运用到输送带的动力学分析中,提出了输送带的黏弹性模型。当时广泛采用的输送带模型是 Vogit 模型[图 1-2(b)],该模型可以反映材料的蠕变特性,但不能反映材料的瞬时应变和松弛效应。从其物理方程来看,只有在无穷大力的作用下,材料才能产生瞬时应变,这就决定了该模型不能很好模拟输送带对瞬时应变的响应。

针对 Vogit 模型的不足,研究人员提出了三参数模型[图 1-2(c)]。该模型能很好地反映瞬时应变产生的冲击载荷对输

送带动应力的影响。

1984年,波兰的 Nordell 和 Ciozda,首次给出了输送带黏弹性四参数模型[图 1-2(d)],使输送带黏弹性分析模型的精度得到进一步提高。

尽管黏弹性力学理论提供了由更多的弹簧和阻尼器通过串联或并联形成的更为复杂的黏弹性模型,能够更加逼近材料真实的力学特性,但是,考虑到带式输送机运行中边界条件的复杂性和不确定性,复杂模型的应用受到了限制,因此在实际的研究中大多采用上面提到的输送带模型及其考虑摩擦力的形式。

从工程应用研究的角度来看,带式输送机中配置的拉紧装置可自动补偿输送带的变形,使得输送带的松弛效应和对应变载荷的响应都不太明显,实际分析中可以不予考虑。从输送带的结构来看,输送带的带芯骨架材料几乎承受输送带工作时的全部负荷,力学性能表现为弹性,其橡胶覆盖层的力学性能表现为黏性,而在使用中输送带带芯与覆盖层不能分离的基本要求,决定了两种材料的变形应相互协调。这正好与 Vogit 模型的特点相吻合。因此,Vogit 模型成为目前普遍采用的输送带黏弹性力学模型。

我国对输送带黏弹性力学性能的研究开始于 20 世纪 80 年代后期。1988 年,李光布分别对钢丝绳芯和帆布芯输送带的动态弹性模量进行了分析和实验测定;1989 年,刘克勋、黄松元在研究了输送带黏弹性力学行为的基础上,给出了输送带黏弹性性能的测试方法;2008 年,侯友夫对帆布芯和钢丝绳芯输送带

的动态特性进行了比较系统的实验研究,得出许多重要的结论。

### 1.3.2 输送带动力学模型

从公开的文献资料看,20世纪60年代,苏联的 ПИАНКРАТОВ 等人首先开始在简化的力学模型上进行带式输送机动力学问题的研究,并建立了带式输送机在非稳定工况下运行的动力学方程。

其后,德国汉诺威工业大学的 Vierling, Oehmen, Funke 等人进行了一系列的研究工作。Funke 在 1974 年完成的博士论文中对输送带的动态特性进行了深入研究,用两个相似的、连续的单元来描述离散后输送带的承载段和空回段,这两个单元各自的弹性响应经滚筒的运动耦合组成输送带的整体响应,从而给出了第一个有实际意义的输送带动力学模型。

1986 年,波兰的 Zür 研究了当时常用的几种输送带黏弹性模型,考虑了模型简化程度对输送带仿真精度的影响之后,给出相应的动力学微分方程,在方程中考虑了输送带的刚体位移。

我国对带式输送机动态分析的研究开始于 20 世纪 80 年代后期。1989 年,刘克勋和黄松元等首次采用计算机对输送机的启动过程进行了模拟研究。他们提出的动力学方程不仅考虑了带速对运行阻力的影响,还考虑了刚体位移和弹性变形的影响,使输送带动力学分析模型的精度得到了提高,但由于无法确立输送带刚体位移和弹性变形间的关系,模型的求解比较困难。

2001 年,侯友夫在考虑输送带黏弹特性的条件下,提出了



基于黏弹性 Vognit 模型的输送带纵向振动微分方程,首次体现了输送带及其上物料负载不均匀的实际工况,并考虑了输送带刚体位移的影响,使动态分析方程描述的准确性得以提高。然而考虑到微分方程及输送带边界条件和初始条件的复杂性,要得到该方程的解析解非常困难。

在对输送带动力学模型研究不断深入的同时,对输送带黏弹性振动微分方程的精确解的理论研究工作也一直没有间断。2000年,李玉瑾从黏弹性动力学入手,得到输送带的黏弹性振动微分方程,对其在加速、减速和紧急制动时精确解的计算方法进行了研究,并通过对比,得出使用传统启动装置和使用软启动装置输送机的动力学方程精确解的计算方法;2002年,又在将带式输送机系统假设为连续弹性体系统的基础上,得到其黏弹性振动方程,进而给出精确位移解和动张力的计算公式,并与有限元分析结果进行了对比。2005年,李光布从理论上分析了带式输送机固有特性,研究了其固有频率和主振型,在此基础上给出了系统频率方程。

### 1.3.3 输送带动力学模型的数值解析方法

由于获得带式输送机动力学微分方程的解析解非常困难,一般采用数值分析的方法,运用计算机仿真进行求解。目前运用最多的数值解析方法是有限元法。

最早建立有限元分析模型的是德国学者 Funke。1973年,他提出带式输送机动力学分析模型,其方程的解析结果能够反映带式输送机非稳定运行工况时的动态性能,从而使得大容量