

DAISHISHUSONGJI

DONGTAI

TEXING

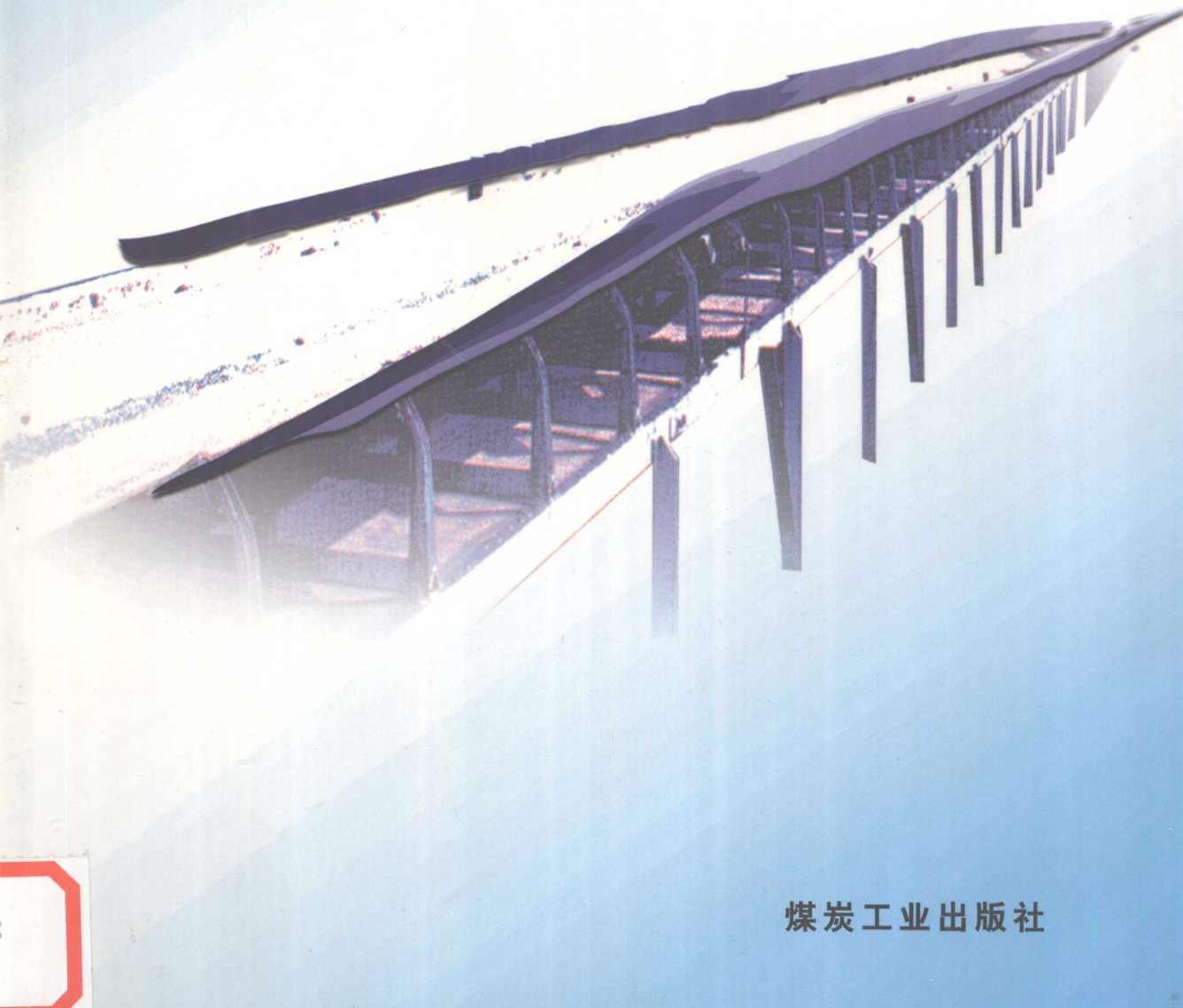
JIKONGZHI

JISHU

# 带式输送机

# 动态特性及控制技术

侯友夫 黄民 张永忠 著



煤炭工业出版社

# 带式输送机动态特性及控制技术

侯友夫 黄 民 张永忠 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

### 图书在版编目(CIP)数据

带式输送机动态特性及控制技术/侯友夫等著. —北京:煤炭工业出版社, 2004

ISBN 7-5020-2482-4

I. 带… II. 侯… III. ①带式输送机—动态特性  
②带式输送机—控制系统 IV. TH238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 061302 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)  
北京房山宏伟印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*  
开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub>  
字数 187 千字 印数 1—1,200  
2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷  
社内编号 5253 定价 20.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

# 前 言

带式输送机是输送散装物料的主要设备之一，具有连续运行、运输能力大、运行阻力小、耗电量低、运行平稳、输送过程中对物料的破碎性小、较易实现自动控制等优点，广泛应用于煤炭、冶金、港运、建材等部门。

随着国民经济的发展和科学技术的进步，带式输送机正朝着长距离、高速度、大运量、大功率方向发展，为了保证带式输送机安全、可靠、高效和经济地运行，对其动态特性、控制策略、状态监控与综合保护等方面的问题开展研究工作显得十分重要。特别是煤矿井下使用的带式输送机，工作条件较差，环境较恶劣，一旦出现事故将造成很大的损失，深入地开展这方面的研究工作则更为重要。本书是在国内外专家、学者和工程技术人员有关研究工作的基础上，结合作者的研究成果写作而成的，以期对带式输送机的进一步发展起到促进作用。

本书重点研究制约带式输送机进一步发展的关键技术问题，如输送带的动力特性、带式输送机动态特性、可控起动技术、自控张紧技术、状态监控与综合保护技术等，理论紧密联系实际，理论分析与试验研究相结合，突出重点、简明扼要。本书的有关研究成果已在设计工作和生产实践中得到应用，并取得较好的成效。

作者在写作过程中参阅了大量有关文献，在此向这些文献的作者一并致谢。本书的研究工作得到了国家攻关子项目、博士点基金项目、原煤炭部基金项目的资助，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，恳切希望各位读者批评指正。

作 者

2004年5月

## 内 容 提 要

本书较系统地论述了带式输送机动态特性及控制技术。第1章简要地介绍带式输送机的工作原理、结构、发展方向、关键技术及本书的主要内容；第2章论述输送带的动力特性及其振动理论分析、输送带的动态试验；第3章对带式输送机的动态特性进行分析，建立了整机动态分析模型和软件，通过理论分析和试验研究，讨论带式输送机动态特性的主要影响因素和控制策略；第4章论述带式输送机对驱动装置的要求，对有关的驱动装置进行评价，讨论由盘式制动器与液压比例技术相结合的控制策略，并进行理论分析和实验研究；第5章论述带式输送机对张紧装置的要求，对其发展过程进行归纳，讨论输送带自控液压张紧的控制策略，并进行理论分析和试验研究；第6章系统地论述针对带式输送机断带、撕带、火灾等重大事故的各类监控方法和技术，以及带式输送机整机的实时综合保护技术与系统。

本书可作为研究生教材，也可供本科生和有关工程技术人员参考。

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 带式输送机的工作原理及结构 .....	1
1.2 带式输送机的发展方向 .....	2
1.3 带式输送机的关键技术 .....	3
1.4 本书的主要研究内容 .....	4
<b>第2章 输送带动力特性研究</b> .....	5
2.1 输送带的基本特性 .....	5
2.1.1 粘弹性材料特性的研究概况 .....	5
2.1.2 输送带的静特性与动特性 .....	9
2.2 输送带振动的理论分析 .....	12
2.2.1 输送带纵向振动的理论分析 .....	12
2.2.2 输送带横向振动的理论分析 .....	14
2.3 输送带动态特性试验研究 .....	18
2.3.1 试验研究内容 .....	18
2.3.2 试验研究方法 .....	18
2.3.3 试验装置 .....	19
2.3.4 试验结果 .....	20
2.4 本章小结 .....	24
<b>第3章 带式输送机动态特性分析</b> .....	26
3.1 带式输送机动态分析所要解决的主要问题 .....	26
3.2 带式输送机的动态分析模型 .....	26
3.2.1 带式输送机的物理模型 .....	27
3.2.2 带式输送机的数学模型 .....	28
3.2.3 带式输送机动态分析软件 .....	40
3.3 典型带式输送机的动态仿真与试验验证 .....	42
3.3.1 典型带式输送机的物理模型 .....	42
3.3.2 典型带式输送机动态特性的实地测试 .....	44
3.4 带式输送机的动态分析与控制策略 .....	46
3.4.1 驱动装置的影响分析 .....	46
3.4.2 起停阶段应力波的传播特性 .....	48

3.4.3	载荷对动张力的影响	48
3.4.4	张紧点位置对动张力的影响	49
3.4.5	驱动装置与张紧装置对动张力的综合作用	49
3.4.6	张紧力对动张力的影响	50
3.5	本章小结	52
<b>第4章</b>	<b>带式输送机可控起动技术</b>	<b>53</b>
4.1	带式输送机对驱动装置的要求	53
4.2	驱动装置的评价和控制策略的制定	53
4.3	可控起动装置工作原理	57
4.4	控制系统数学模型	58
4.4.1	传递函数	58
4.4.2	传递函数中系数的确定	60
4.5	系统动态特性分析	60
4.5.1	系统动态响应	60
4.5.2	系统参数变化对动态特性的影响	61
4.6	可控起动装置特性的实验验证	62
4.7	电动机软启动控制器	64
4.8	本章小结	66
<b>第5章</b>	<b>带式输送机自动张紧技术</b>	<b>67</b>
5.1	张紧装置研究概况	67
5.2	自控液压张紧站的控制策略	68
5.3	自控液压张紧站的数学模型	69
5.3.1	进油路的数学模型	72
5.3.2	回油路的数学模型	74
5.3.3	系统的整体模型	74
5.3.4	对单位阶跃输入的响应特性分析	75
5.4	自控液压张紧站的实地测量	76
5.5	本章小结	78
<b>第6章</b>	<b>带式输送机实时监控与综合保护技术</b>	<b>79</b>
6.1	带式输送机断带的监控与保护	79
6.1.1	钢绳芯胶带接头损伤和断裂的在线监测和预报	79
6.1.2	断带防下滑的方法及装置	89
6.2	钢绳芯胶带纵向撕裂的实时监控与保护	103
6.2.1	钢绳芯胶带撕带的起因及发生机理	103
6.2.2	钢绳芯胶带撕带的常见监测与诊断方法	103
6.2.3	基于附加压力监测的撕带诊断方法	105

6.3 带式输送机火灾的监测与预报 .....	108
6.3.1 带式输送机火灾的起因分析 .....	109
6.3.2 带式输送机火灾的常见监测与预报方法 .....	109
6.3.3 带式输送机火灾的综合在线监测 .....	111
6.4 带式输送机实时工况监测与故障诊断系统 .....	114
6.4.1 系统的硬件构成 .....	114
6.4.2 下位机工况监测系统 .....	115
6.4.3 上位机工况监测系统 .....	118
6.4.4 分布式通讯系统的设计 .....	120
6.5 本章小结 .....	121
主要参考文献 .....	122



# 第1章 绪 论

## 1.1 带式输送机的工作原理及结构

带式输送机是以输送带作为牵引机构和承载机构的一种连续运输机械，它是输送散状物料的主要设备之一，具有连续运行、运输能力大、运行阻力小、耗电量低、运行平稳、运途中对物料的破碎性小、较易实现自动控制等优点，广泛应用于煤炭、冶金、港运、建材等部门。随着国民经济的发展和科学技术的进步，带式输送机的应用将越来越广泛。

带式输送机的结构简图如图 1-1 所示。带式输送机的工作原理如下：输送带绕经机头驱动滚筒和机尾改向滚筒形成一个无极的环形带，同时上、下输送带分别支承在上、下托辊上，张紧装置给输送带以正常运转所需要的张力。当驱动装置带动驱动滚筒旋转时，借助驱动滚筒与输送带之间的摩擦力使输送带及其上面的货物一同运转，输送带上的货物被载运到机头后，由于输送带的转向而实现卸载。

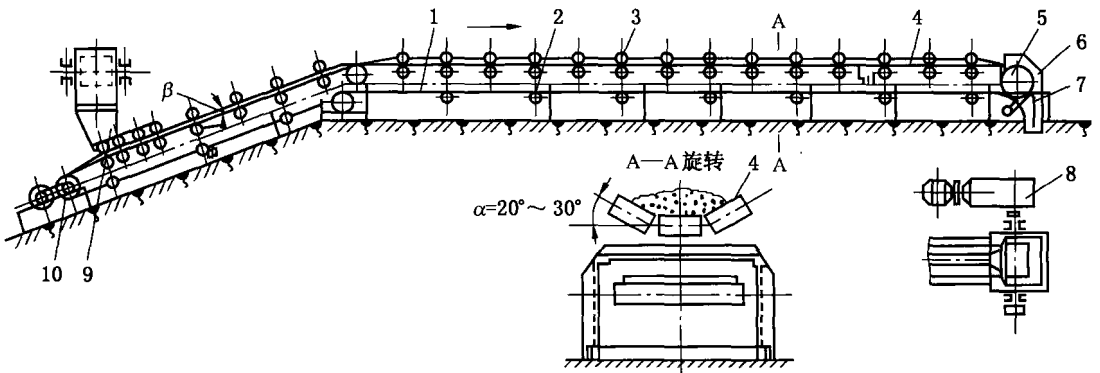


图 1-1 带式输送机结构简图

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

带式输送机的机身横断面如图 1-1 中的 A-A 示图。上输送带运送所载货物，输送带的这一部分称为工作段或重段；下输送带不运送货物，称为空段。

带式输送机可用于水平及倾斜运输。通常情况下，沿倾斜向上运输原煤时，倾角不能大于  $18^\circ$ ，向下运输时不能大于  $15^\circ$ ，运送附着性和黏着性大的物料时，倾角还可以适当增大。

带式输送机缺点是：输送带成本较高且较易损坏，不宜运送坚硬有棱角的物料；与其

他设备相比，初期投资较高，同时不能用于倾角太大的场合。

带式输送机类型很多，适用范围和特征各不相同。其主要类型有：普通型带式输送机、绳架吊挂式带式输送机、可伸缩带式输送机、强力带式输送机、钢丝绳牵引带式输送机、中间多级驱动带式输送机以及大型气垫带式输送机等。

随着我国煤炭工业的迅速发展，矿井运输量日益增大，在大型矿井的主要水平及倾斜巷道，采用大运量、长距离的带式输送机极为有利，钢丝绳芯胶带输送机就是为了适应这种需要而设计的一种强力带式输送机。它与普通型带式输送机的不同之处在于，它采用钢丝绳芯胶带代替了普通输送带，其抗拉强度较普通型提高了几十倍，甚至近百倍，大大地提高了带式输送机的输送能力。

## 1.2 带式输送机的发展方向

提高单机效率、提高生产率一直是人们追求的目标。随着科学技术的进步和国民经济发展的需求，目前带式输送机的发展方向主要集中在长距离、高速度、大运量、大功率等方面。

为了提高物流系统的可靠性和经济性，带式输送机的单机输送距离越来越长。对同一运输系统，单机长度增加意味着总台数的减少，若按等概率故障统计，整个运输系统的故障概率将减少，同时管理人员也相应减少。目前带式输送机运输系统均向长距离方向发展。例如：西班牙的西撒哈拉带式输送机系统，线路总长为 100km，整条线路由长度为 6.9~11.8km 的 11 条带式输送机组成。在选择该系统前，专家们曾对采用带式输送机输送、管道输送、汽车运输和铁路运输诸方案进行了比较，在技术、经济等方面经过周密的研究后认为，带式输送机最合适，并且单机长度为 9km 左右最经济。荷兰鹿特丹矿带式输送机系统，线路总长 206km，整条线路由 17 条带式输送机构成。目前世界上单机最长的带式输送机达 30.4km，已在澳大利亚铝矾土有限公司采矿场使用。

提高运输量，一般有两条途径可供选择：提高带速或增加带宽。在带式输送机成本构成中，输送带占有很大比重，大型带式输送机一般在 50% 左右。增加带宽会大大增加设备投资，而且安装空间也要明显增加。特别是在煤矿井下这种工作场所，巷道空间狭小，增加带宽意味着增加巷道宽度，巷道开拓成本也将明显增加。因此，从经济上分析，提高带速是首选途径。研制高速带式输送机如同建设高速公路，其经济效益是不言而喻的。目前国外高速运行的带式输送机速度已达 7~12m/s。德国莱茵褐煤矿有限公司福尔图纳露天矿使用的一条带式输送机，其带速为 7.4m/s，输送量可达 37500t/h。就煤矿井下使用的带式输送机而言，国外产量为 3~5 Mt/a 的高产高效矿井，工作面运输巷可伸缩带式输送机的主要参数一般为：运距 2000~3000 m，带速 3.5~4.0 m/s，输送量 2500~3000 t/h，驱动总功率 1200~2000 kW；强力带式输送机运距大于 3000 m，带速 4.0~5.0 m/s（最高可达 8 m/s），输送量 3000~4000 t/h，驱动总功率 1500~3000 kW（最大达 11000 kW）。

我国在长距离、高速度、大运量、大功率带式输送机的研究、设计与制造方面，尽管已取得了可喜的成绩，但仍存在较大的差距。例如，目前我国带式输送机的运行速度大多为 2.0~2.5m/s，最高速度仅为 4.5m/s。据有关专家分析，我国带式输送机整体技术水

平比国际先进水平大约落后 10~15 年。因此,对带式输送机进行深入的理论与设计研究,已成为目前的重要工作内容。

### 1.3 带式输送机的关键技术

为了实现带式输送机向长距离、高速度、大运量、大功率方向发展,必须对其关键技术问题进行深入的研究,在实践中不断提高其技术水平。这些关键技术主要包括:动态特性分析和动态优化设计技术、可控起动技术、自动张紧技术、电控与监测自动化技术等方面。

#### (1) 动态特性分析和动态优化设计技术

带式输送机是一个复杂的粘弹性—弹性组合系统,在其运行过程中,特别是起动和制动过程中,存在着各种形式的振动,如输送带的振动、传动部件的振动、支承部件的振动、物料的冲击振动等,这里都将引起较大的动载荷。其中,输送带的动态特性是最主要的影响因素,它影响着整机的工作性能。

影响输送带动态特性的主要因素有两个:输送带本身的动态特性和外部激励条件。输送带组织是复合材料组成的三向异性体,具有粘弹性特性,要准确描述其动态特性比较困难,即使理论上可以采用近似程度较好的组合模型,但模型参数的试验测定也相当复杂。另外,输送带的非线性特性在不同类型的输送带(如钢绳芯输送带和整芯输送带)和不同的使用工况条件下也存在差异,这都给输送带动态特性的研究带来较大困难。输送带在工作过程中,各种外部激励条件,如驱动与拉紧装置的性能、驱动电机数目、拉紧点位置、托辊性能、托辊的布局、物料特性、物料的冲击等都影响到输送机的使用性能。此外,运行中许多边界条件是不断变化的,如托辊与输送带表面接触点的变化、装料点与卸料点带段单元质量的变化、摩擦系数的变化、输送带在驱动滚筒上的弹性滑动等。为使带式输送机整机性能达到最优,需要对上述各种因素进行整体综合研究,寻找其最佳配置方案。对这些问题的模型处理单纯应用数学方法来解决有很大困难,只有利用计算机对其进行动态仿真分析与试验相结合,才能得到满意的精度,这也是 20 世纪 80 年代以来带式输送机研究的主要方向与重要手段。

随着带式输送机运距和速度的提高,运行过程中的冲击、振动和动载荷的问题更加突出,传统的静强度加安全系数(输送带的安全系数高达 7~15)的计算方法,已远不能满足输送机发展的要求。为了提高设备运行的可靠性,降低设备的投资费用,必须大力开展动态特性分析和动态优化设计方法的研究工作。例如,澳大利亚 GREGORY 煤矿使用的一条带式输送机,其主要参数为:运距 10000m,带宽 0.9m,输送量 1400t/h,带速 4.2m/s,提升高度 30m,驱动总功率  $3 \times 355 + 840$ kW。采用动态优化设计后,安全系数为 4.8,仅选用 ST1600 钢丝绳芯输送带,大大地节省了费用。我国在煤炭企业就有带式输送机上万条,若能有效地进行动态分析和优化设计,并采用正确的控制策略,使输送带的安全系数降低到 4~7,则在相同的工况条件下可选用较小规格的输送带,从而大大降低制造成本,带来巨大的经济效益。

#### (2) 可控起动技术

随着带式输送机的发展,传统的电动机直接起动或电动机与耦合器联合起动已经远远

不能满足使用的要求。长距离、高速带式输送机由于起动负荷较大，且运行速度较高，必须对其起动过程加以控制，即按最优的起动速度曲线平稳起动，使起动时间、起动加速度控制在允许范围内。根据我国有关标准的规定，起动加速度不得大于  $0.3\text{m/s}$ ，以减少动载荷和瞬时冲击，同时可以避免输送带和其他元部件的损坏。国外开展了大量的研究工作，研制出相应的可控起动装置，如：变频调速装置、差动轮系液粘调速装置、液力调速装置等。国内的研究工作也取得一定的成绩，液力调速装置已有较成熟的产品。但如何在吸收国外先进技术的基础上，研制出更加符合我国国情的各类可控起动装置，仍需进一步加强研究工作。

### (3) 自动张紧技术

张紧装置的主要作用是保证输送带有足够的张紧力，以实现摩擦传动，避免驱动滚筒打滑。长距离、高速带式输送机由于运送距离长、输送带变形大，且随着运行过程中工况条件的变化，输送带变形的变化量也较大，这必将引起输送带的张力发生变化，影响输送机的正常工作。因而对张紧装置提出了新的要求，即：随着输送带张力的变化能自动调节张紧行程和张紧力，且响应速度快，响应时间应小于输送带张力变化周期，保证输送带有较稳定的张紧力。为此，必须开展自动张紧技术和装置的研究。

### (4) 带式输送机实时工况监测及综合保护技术

带式输送机由于长期运行及其他方面的各种原因，故障时有发生，甚至造成事故。特别是在矿井下工作的带式输送机，工况条件较恶劣，故障和事故的发生率相对较高，如：输送带跑偏、驱动滚筒打滑、托辊失效、输送带着火、纵向撕裂、接头断裂等。某些事故的发生、尤其是由于输送带引发的事故，往往会带来巨大的经济损失，甚至危及人身安全，且运距愈长、速度愈高，事故的危害性就越大。为了保证带式输送机安全、可靠地运行，国内外均重视带式输送机的工况监测与故障诊断及综合保护，开展了相应的研究工作，并取得一定的成绩，但系统、深入的研究还有待进一步加强。

## 1.4 本书的主要研究内容

针对带式输送机国内外的研究现状和发展趋势，本书着重研究制约带式输送机进一步发展的一些关键技术，主要内容包括以下 5 个部分：

(1) 对输送带本身的动力特性进行试验研究，在与带式输送机运行实际条件相近的边界条件下，寻找其力学特性。

(2) 从动态设计的角度出发，对带式输送机系统的动态特性进行研究，开发动态分析软件，在计算机上交互式地建立带式输送机系统整体模型，动态地模拟输送机在起动、制动、装料、卸料等典型工况下输送带张力的变化特性，并寻求降低动张力的有效方法。

(3) 对驱动系统进行理论分析，探讨最佳起动方式的动力特性及控制策略，设计相应的可控起动装置，并进行实验研究。

(4) 对张紧系统进行理论分析，探讨最佳张紧方式的动力特性及控制策略，研制自控液压张紧装置，并进行试验研究。

(5) 对带式输送机实时监控与综合保护技术进行较系统地论述和研究，设计开发带式输送机实时工况监测系统及保护装置。

## 第 2 章 输送带动力特性研究

输送带是带式输送机的关键部件，也是影响输送机整机性能最核心的部分，其中输送带的动力特性是带式输送机动态设计和分析的基本问题。

输送带的主要功能是承载与运输物料，这要求它本身要有足够的强度与抗冲击的能力。同时，在输送机整机系统中，输送带的费用占很大的比重，只有正确把握输送带的动力特性，才能在保证安全的前提下采用较低的安全系数，选用较小规格的输送带，从而降低成本。因此，输送带设计强度的确定变成了一个优化问题，其求解的准确性则依赖于我们对输送带在各种外界条件下行为特性的了解程度。

以前，由于对输送带在运动状态下的特性缺乏准确的了解，设计时只能采用静态设计方法，即静强度加安全系数的办法，为提高其可靠性，常取较大的安全系数，有时安全系数高达 15，这是一种无奈的选择。随着运送距离的加长、运量的增大、速度的提高，动应力将明显增加，单纯地依靠提高安全系数已无法解决，迫切要求对输送带本身的动态特性进行深入的研究，为降低成本提高经济性提供可靠的保障。

### 2.1 输送带的基本特性

长距离、高速度、大运量的带式输送机所用输送带由带芯和覆盖层两大部分组成。目前，主要有两种输送带可供选择：一种为整芯胶带，另一种为钢绳芯胶带。其覆盖层的主要成分是各种橡胶和塑料，其特性为粘弹性，力学行为比较丰富，对输送带特性有明显的影响。带式输送机出现的初期，由于运送长度都不大，输送带在理论研究中是被假设作为弹性体甚至是刚体进行处理，研究的结果基本上可以指导生产实践。当运送距离越来越长时，这种假设与实际情况的差距也越来越大，有时甚至完全行不通，这时必须考虑覆盖层材料的影响，这使得一种更接近于输送带本质特性的粘弹性被引入了输送带的数学模型。

#### 2.1.1 粘弹性材料特性的研究概况

##### 1. 粘弹性阻尼材料

橡胶是一类高分子聚合材料的总称，是一种粘弹性材料。对橡胶类粘弹性材料的研究属于多学科共同的问题，主要包括高分子材料、力学、机械工程等，它们各自的研究目的、手段和方法不同。

高分子材料的研究人员，主要着重考虑材料的配方、掺杂、硫化、交联、聚合条件等对其生成材料的蠕变、松弛或动态特性的影响，以便聚合出符合工程需要的新材料来。他们主要从分子结构、分子运动等理论入手，对影响高聚物特性的各个因素寻找其机理，并找出它们的关系。

研究材料粘弹性特性的另一种基本方法是用与分子结构无关的数学力学分析方法来描述粘弹性物体。这种方法从宏观的观点出发，考虑其粘弹性效应，建立恰当的应力-应变

关系模型，并对其进行应力分析。

最早建立的粘弹性本构关系模型是 Maxwell 模型和 Voigt 模型。Maxwell 模型由弹簧和阻尼器串联而成，此模型可以解释粘弹性的应力松弛现象。Voigt 模型则由弹簧和阻尼器并联而成，它可以描述粘弹性的蠕变现象。虽然它们都不是十分准确，但对分析问题还是十分有用。通常的做法是将两个模型适当组合起来，构成最一般的标准导数模型，在一维情况下，其表达式为：

$$\left(1 + p_1 \frac{d}{dt} + p_2 \frac{d^2}{dt^2} + \dots + p_n \frac{d^n}{dt^n}\right) \sigma = \left(q_0 + q_1 \frac{d}{dt} + q_2 \frac{d^2}{dt^2} + \dots + q_n \frac{d^n}{dt^n}\right) \epsilon \quad (2-1)$$

另一类描述粘弹性行为的模型是 Ronald L. Bagley 提出的分数导数模型。分数导数模型符合粘弹性材料的分子理论，它比标准导数模型优越之处在于只需要较少的几个参数，就能较好地描述材料的粘弹性行为。

由这些本构关系模型，可以得到一些特殊情况下的解析解或数值解。如 Ronald L. Bagley 应用分数导数模型，采用有限元法分析粘弹性阻尼结构。不过，在其求解过程中，要对模型中的参数进行分数化，以便对其进行变换，这将使问题的规模急剧增加，给求解带来较大的困难和误差。特别是对于实际的结构，其本身自由度较多，因此就显得更加不合适。标准导数模型虽然参数可能较多，模型的误差较分数导数模型大一些，但对于动力响应计算，标准导数模型的结果精度反而要好得多。在粘弹性力学方程中，经常也考虑到由于阻尼耗散发热带来的温度升高的影响，因温度的升高也将导致材料本身特性的改变，引起应力—应变关系的变化，这实际上是一个热粘弹性耦合的问题。前苏联的科研人员就该类问题进行了初步的研究。

连续介质力学中对粘弹性问题的处理方法，是在满足某些条件的情况下，依据弹性—粘弹性对应的原理，对一些具体问题求出其解析解或数值解。对结构复杂的情况，一般是先建立其运动方程，再依据变分原理，利用合适的单元进行离散，寻求稳定和有效的数值计算方案，对其进行求解。有限元法是连续介质力学分析的一个强有力的数值工具，在粘弹性动力学响应方面，有关的研究也较多。但其主要困难在于建立适当的便于数值分析的应力—应变关系，并找到合适的求解途径，由于问题的复杂性，目前的研究离工程实际应用还有较大的距离。

## 2. 粘弹性材料特性的试验研究

要了解粘弹性材料的性质，必须要对其进行材料试验（其试验结果是理论研究或数值分析的基础，是计算和分析粘弹性材料或结构必不可少的）。另一方面，具体粘弹性元件的动态特性比材料本身更复杂，目前大多采用试验研究的手段。因此试验研究在粘弹性材料特性的研究中占有非常重要的地位。

对橡胶类粘弹性材料的试验方法主要有：在频域内进行的直接振动法或共振法，在时域内的松弛试验方法和波传播法，还可按试验原理或承载方式等进一步划分。G.M. Smith 利用基础激振方法单向激振小型质量—弹簧系统，由小变形的剪切试样的试验来测量橡胶类材料在 0~3000Hz 范围内的动态储能和耗损模量。D.I.G. Jones 利用纵向激振的振动梁法，分别测量无阻尼层和有阻尼层时的共振频率和整个梁的损耗因子，由此就可以确定粘弹性材料的动态模量，结果证实此方法准确可靠。D.I.G. Jones 用冲击锤敲击试样上的重物，由冲击响应曲线即可测量试样共振频率处的动态特性。此方法在原理上

没有什么创新的地方，它只是提供了一种简单的方法来完成材料动态特性的测试。它为科研人员和工程技术人员提供了一种简单快速地测试阻尼材料特性的手段，它也可以用来初步验证厂家提供的工程材料的相关数据。

D. I. G. Jones 采用多层阻尼梁共振的方法，测量材料在几个共振频率处的动态特性，测量频率从 100Hz 到 2000Hz。采用两端固支梁的形式，由无阻尼层到有 1~3 层阻尼材料的试验结果，即可确定一些共振频率处的动态特性。同时讨论了多层梁力学模型中参数选择的问题，说明了可用等价单自由层阻尼梁模型来代替多层约束阻尼层的试验，这将大量减少模型中的参数，大大简化多层约束阻尼梁的试验分析。Mickeal L. Drake 对测量材料阻尼特性的不同试验方法进行了比较，从均方根误差的角度来评价和分析，共振阻尼梁法为阻尼设计或系统阻尼预测提供了最好的材料性质数据。

Surendra N. Ganeriwala 利用傅利叶变换力学分析方法来确定非线性粘弹性材料的动态特性。朱华用数字谱分析方法测量粘弹性阻尼材料恒温下的动态特性，该方法一次可得到一定频率范围内的材料特性，效率比较高，精度也比较高。以上的试验方法均基于正弦动态试验原理，它不仅较复杂而且试验条件对其结果有较大的影响，诸如预载、动态应变大小、频率，甚至载荷的作用方式和位置、边界条件、试样尺寸、松弛现象、耗散发热等对其均有影响。Belginm 设计了一套自动动态测试分析装置，在大量分析研究的基础上，他假设材料松弛模量函数的形式为：

$$E(t) = A + Bt^{-\alpha} \quad (2-2)$$

根据试样的松弛试验结果，确定其中常数  $A$ 、 $B$  和  $\alpha$ ，利用松弛模量与动态模量之间的相互关系，经计算机处理给出我们感兴趣的材料动态特性。这套装置和试验方法基本克服了直接在频域内测量动态特性的那些试验方法的缺点。

上面讨论的都是材料特性，工程技术人员真正感兴趣的是粘弹性元件的诸如刚度、阻尼等特性。美国太空总署 (NASA) 基于下面的目的委托美国力学技术股份有限公司 (Mechanical Technology Incorporated) 对橡胶类材料和元件的动态特性进行了一系列的试验研究，包括：由橡胶类材料粘弹性模型的有关常数来确定橡胶阻尼结构或元件的刚度、阻尼；建立一套适合于工程设计人员采用的方法，用来预测其他形状的元件和工况条件下的动态特性刚度和阻尼。

从 1973 年到 1981 年的 8 年时间里发表了一系列报告，这是到目前为止在这方面较为系统和全面的研究之一。T. Chiang 等利用测量较宽频率范围内橡胶材料和元件动态特性的方法——基础激振、共振质量法设计了一套试验装置，能通过更换夹具的方法实现多种载荷的作用方式，建立了试验数据的采集、处理和分析的一整套方法，用 3 个参数的标准导数模型来拟合试验结果。P. K. Gupta 等在上述试验装置的基础上，增加了一个温度控制部分，测量了在温度不变化的情况下的动态特性，主要考察激振频率、预载、形状、振幅对其动态特性的影响，发现在温度不变的情形，刚度和阻尼随频率变化很小，预载对其影响也很微弱。另外，动态特性与频率的关系可通过幂函数来近似表示：

$$Y = A\omega^B \quad (2-3)$$

式中  $Y$  ——所研究的特征量；

$A$ 、 $B$  ——常数，由试验数据来决定。

试验还发现共振质量的变化将导致测量刚度和阻尼出现不连续的跳跃，对阻尼的影响

尤其明显。L.K.Nordell 采用了温-频等效原理来处理温度的变化、几何形状的影响用形状因子来表示的方法，考察了材料、温度、振幅、频率等因素对材料和元件动态特性的影响，提出了根据材料试验的结果来预测规则形状的阻尼元件动态特性的方法和公式，结果表明 Beam-column、Gobel 预测值与试验结果符合较好。M.S.Darlow 等对聚丁乙烯阻尼元件在旋转载荷作用下的动态特性进行了试验研究，结果表明了旋转载荷下的动态特性试验数据很分散。这主要是由于旋转载荷下工况因素较复杂的缘故，不过从其测量数据的平均值来看，与单向激振时的数据符合得还是很好。旋转载荷下，橡胶元件动刚度测量值介于 Beam-column 预测值和 Gobel 预测值之间，损耗因子的实测值较分散。

### 3. 粘弹性材料动态特性的影响因素

众多试验研究发现，影响橡胶类粘弹性材料动态特性的因素很多，如材质、温度、振动频率、振幅、结构尺寸、耗散水平及因耗散发热引起的温升、载荷作用方式及预载等，现将其中一些主要影响因素的研究结果简述如下。

#### (1) 材料影响

橡胶类材料属于高分子聚合物，其研究表明，生胶材料、掺杂、填料、交联、硫化等加工处理过程对其最终聚合材料的动态特性均有影响。即使是同一配方的材料，由于原料来源和生产时间的差别，其特性也受一定影响，不过这一影响很微弱，从工程应用的角度一般不予考虑。生产厂家一般用诺模图给出材料的动态特性，也有仅给出硬度、最佳使用频率、温度范围和模量等有关数据。

#### (2) 温度的影响

温度是材料中热能的一种量度，随着温度的升高，材料中的热能将促使聚合物分子的链段发生平移或转动，在玻璃化转变附近，温度的微小变化将导致动态模量发生几个数量级的改变。动态模量受温度影响很大，以致只得用对数坐标来表示。典型的动态特性随温度变化的曲线如图 2-1 所示。从图中可以看出，材料的动态模量  $E$  和损耗因子  $\eta$  随温度变化明显地可分为玻璃态、转变区和橡胶态 3 个区域。在温度较低的玻璃态中，动态模量  $E$  较大，损耗因子  $\eta$  较小，此时材料刚性较大，而阻尼较低，这是由于温度较低时，高分子结构中热能不易克服分子链段之间的势垒而产生相对运动的缘故。在转变态区域内，动态模量随温度的上升迅速减小，但损耗因子在这一区域内将达到极大值，此时聚合物分子链段围绕固定位置振动的幅度增大，材料有良好的阻尼减震性能。在橡胶态区域内，材料的动态模量处在一个较低的相对稳定阶段，此时其损耗因子也较低，材料的阻尼作用也较小。

#### (3) 频率的影响

对橡胶类粘弹性材料的试验研究表明，频率也是影响其特性的非常重要的一个因素，典型的动态特性随频率变化的曲线如图 2-2 所示。储能模量  $E_1$  值在低频区较小，在高频区很大，各对应于橡胶态和玻璃态，且不随频率发生明显变化。而在某一频率范围内，随着频率的增加， $E_1$  迅速增大，呈现粘弹态。损耗模量  $E_2$  在低频区和高频区都趋于零，即在橡胶态和玻璃态都几乎不消耗能量，只有在转变态区域才出现最大值。在转变态区域损耗正切也出现最大值，但比  $E_2$  出现最大值时的频率稍低。

进一步的研究发现，在温度和频率两个影响因素之间存在着某种相互等价的关系，即温频等效原理。低温低频下的试验等价于高温高频下的试验，而高温低频下的试验等价于



低温更低频下的试验，并且发现对高聚物的松弛过程来说低温长时间的观察相当于高温短时间的观察。

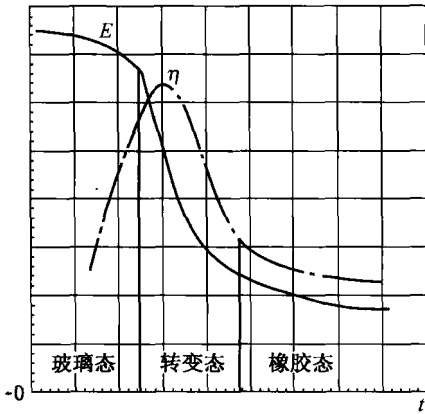


图 2-1 动态特性随温度变化曲线  
E—动态模量； $\eta$ —损耗因子

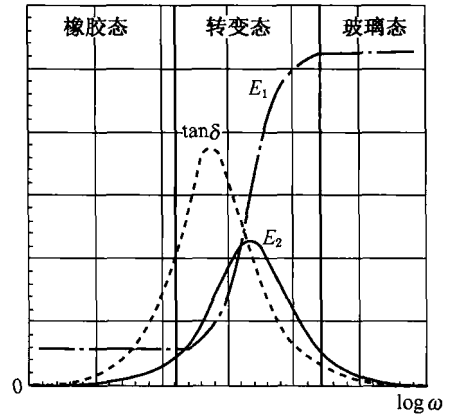


图 2-2 动态特性随频率变化曲线  
 $E_1$ —储能模量； $E_2$ —损耗模量； $\tan\delta$ —损耗正切

#### (4) 振幅与充填物量的影响

应变振幅对材料动态特性的影响被许多研究人员研究过，当应变振幅很小时 ( $10^{-4}$ )，动态模量和损耗因子几乎不受影响，这一区域属于线性粘弹性行为。另外，随着材料中充填成分的增加，应变振幅对其动态特性的影响也增加，这可能是由于在较大的应变振幅时，充填的颗粒会脱离橡胶基，导致了动态模量的减小和损耗因子的增加。

#### (5) 预加载荷等其他因素的影响

橡胶类粘弹性材料当其几何尺寸和结构形式不同时，将使其内部应力分布出现差异，从而导致它们呈现出不同的阻尼和刚度性质，有时作为近似处理的手段，将它们通过形状因子来表示。对圆柱体试样的试验表明，预加载荷变化不大时，对动态特性的影响很小。常温下圆柱形试样或剪切试样受预载的影响也不明显。

### 2.1.2 输送带的静特性与动特性

上面所讨论的都是有关覆盖层粘弹性材料本身特性研究的进展，作为基础理论研究，其试验结果无疑有着不可估量的价值，但这些成果离工程应用还有相当的距离。输送带的特性是覆盖层粘弹性材料和带芯在特定的结构、形状、载荷方式等边界条件下的具体表现。工程实际应用对输送带特性的理论研究所采用的模型化方法提出了要求，即模型必须反应某具体应用背景下的输送带材料特性。这是与一般科学探索研究有着明显不同的地方，它的目的明确而直接，就是为工程应用服务。本着这一目的，下面对带式输送机输送带的粘弹性特性做一些探讨。

#### 1. 输送带的静特性

输送带的静特性是指输送带在无限缓慢的外力作用下，经过无限长的时间后所表现出的静应力  $\sigma$  与静应变  $\epsilon$  之间的关系  $\epsilon = f(\sigma)$ 。由力学方程可知：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-4)$$