

# 特种

# 带式输送机设计

宋伟刚 著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

TH222

# 特种带式输送机设计

宋伟刚 著



机械工业出版社

本书论述特种带式输送机的设计计算方法。全书共9章：第1章综述了通用带式输送机的研究与发展，对特种带式输送机进行了分类，从创新设计的角度对特种带式输送机的发展进行了讨论；第2章至第9章分别给出了花纹输送带和深槽型带式输送机、平面转弯带式输送机、波状挡边带式输送机、压带式带式输送机、线摩擦带式输送机、圆管带式输送机、气垫带式输送机和钢丝绳牵引带式输送机的发展过程、结构原理和设计计算方法。另外，本书还给出了一些工程设计实例。

本书内容丰富、新颖，反映了国内外带式输送机研究的最新成果。本书可供机械、电力、冶金、化工、煤炭、矿山、港口、建材、粮食等系统从事运输专业的设计人员、工程技术人员、研究人员使用，也可供高等学校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

特种带式输送机设计/宋伟刚著. —北京：机械工业出版社，2007.2

ISBN 978-7-111-20815-0

I. 特… II. 宋… III. 带式输送机—设计 IV. TH238.022

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第011456号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：曲彩云 责任编辑：白刚 版式设计：冉晓华  
责任校对：袁凤霞 封面设计：马精明 责任印制：李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2007年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.5印张·256千字

0001—4000册

标准书号：ISBN 978-7-111-20815-0

定价：28.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：(010)68326294

购书热线电话：(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

# 序

带式输送机是当代最重要的散状物料输送设备。近二十年来,我国带式输送机机设计、制造技术得到了迅猛的发展。在国内的应用中新的纪录不断出现,工程实践经验日益丰富,国内自行设计、制造的带式输送机的单机长度已经超过8km,一条输送机系统线路长度已经达到30km,所涉及的线路布置形式已经不能为国外的工程设计经验所涵盖。在通用带式输送机向着大运量、长距离、高带速发展的同时,为了适用于特定的场所、环境下物料输送的要求,出现了形式各异的特种带式输送机,并且在工业领域的应用日益增多。以气垫带式输送机、圆管带式输送机和波状挡边带式输送机为代表的特种带式输送机已经为用户所接受。

特种带式输送机的结构、形态各异,种类繁多,总结特种带式输送机的发展,归纳它们的设计计算方法是当前的一项有意义的工作,也是当前带式输送机设计与研究工作所急需的。


东北大学宋伟刚教授的《特种带式输送机设计》适应了这种需要。该书的主要特点如下

(1) 综述了通用带式输送机的研究与发展,从特种带式输送机开发的角度对特种带式输送机进行了分类,并从创新设计的角度对特种带式输送机的发展进行了讨论,为新型特种带式输送机的开发提供了一种新的思路。

(2) 选择了应用范围较广的花纹输送带和深槽型带式输送机、平面转弯带式输送机、波状挡边带式输送机、压带式带式输送机、线摩擦带式输送机、圆管带式输送机、气垫带式输送机和钢丝绳牵引带式输送机等主要的特种带式输送机进行论述,全面地反映了当前特种带式输送机的主要趋势。

(3) 从种种特种带式输送机的发展情况入手,进而给出其工作原理、机械结构和设计计算的概要,可以与《通用带式输送机设计》一书共同使用,避免了重复。同时略去了繁琐的推导与数学表达式和应用较少的复杂零部件的结构设计问题,易于工程技术人员参考使用。

(4) 反映了东北大学在特种带式输送机方面的研究成果,并吸收了国内外的最新研究成果。

物流工程学会  
连续输送专业委员会主任委员  
太原科技大学 教授 

2007年1月

# 前 言

撰写本书的目的是希望能够适应国内带式输送机的发展,对特种带式输送机的设计进行系统的阐述,并与作者所著《通用带式输送机设计》一书构成有关带式输送机设计的全面论述。

近年来,带式输送机的设计、制造技术得到了迅猛的发展,通用带式输送机应用日新月异,正在向大运量、长距离的方向发展,在国内的应用中新纪录不断的出现。国内自行设计、制造的带式输送机的单机长度已经超过8km,单条输送机系统线路长度已经达到30km,所涉及的线路布置形式已经不能为国外的工程设计经验所涵盖。在特种带式输送机方面,气垫带式输送机、波状挡边带式输送机等已经被国内工业应用领域广泛接受。圆管带式输送机成为了带式输送机应用的新热点。

全书共9章,主要研究目前已经使用和重要的特种带式输送机的设计问题。第1章综述了通用带式输送机的研究与发展,对特种带式输送机进行了分类,从创新设计的角度对特种带式输送机的发展进行了讨论。第2章至第9章分别为花纹输送带和深槽型带式输送机、平面转弯带式输送机、波状挡边带式输送机、压带式带式输送机、线摩擦带式输送机、圆管带式输送机、气垫带式输送机和钢丝绳牵引带式输送机,给出了花纹输送带的设计倾角确定方法,对深槽型带式输送机大倾角输送物料的原理进行了分析,给出了深槽型输送机托辊组设计的原则和具体结构;通过对现有的各种平面转弯带式输送机的结构分析,导出了转弯半径的计算公式,列出了平面转弯带式输送机设计要点;对压带式带式输送机、线摩擦带式输送机、钢丝绳牵引带式输送机的结构原理进行了分析,详细介绍了发展情况与种类,给出了设计要点;详细给出了波状挡边带式输送机、圆管带式输送机、气垫带式输送机的结构原理与结构设计中所涉及的主要问题,简要给出了波状挡边带式输送机、圆管带式输送机设计计算方法,详细导出了气垫带式输送机的计算方法。

本书汇集了东北大学以及作者的相关研究成果,并吸收了国内外的最新研究成果。撰写过程中得到了蓝天CAD论坛上的很多有益帮助,网名“老铁”对本书提出了中肯的建议,自贡运输机械有限公司的龚欣荣总工程师为本书提供了有用的参考资料。

全书在注重反映特种带式输送机最新发展的同时,尽量避免繁琐的数学公式的推导,尽量少采用复杂零部件的结构设计问题,同时引用了大量的图片。王鹰教授、孟文俊教授、张志威高级工程师有关圆管带式输送机的文献对本书的撰写带来极大的帮助;钢丝绳牵引带式输送机内容主要参考了中国矿业大学主编的《矿山运输机械》一书。

本书受到了沈阳矿山机械(集团)公司、中国重型机械工业协会带式输送机分会、美国罗克韦尔(道奇)公司、机械工业出版社等单位的大力支持。在编写过程中,得到了研究生谭晓峰、王睿等同志的协助。作者向他们表示感谢。

作者还要特别感谢青岛华夏胶带有限公司陈霖总经理对本书出版资金上的支持。由于作者水平有限,时间仓促,疏漏之处难免,恳请读者批评指正。

宋伟刚

2007年1月于东北大学

# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 带式输送机的发展 .....	1
1.2 通用带式输送机的研究 .....	2
1.3 特种带式输送机的发展 .....	6
1.3.1 大倾角与垂直提升 .....	6
1.3.2 降低输送带张力 .....	8
1.3.3 改变输送带支撑方式 .....	10
1.3.4 密闭输送物料方式 .....	11
1.3.5 空间转弯 .....	12
1.4 特种带式输送机与创新设计 .....	12
<b>第 2 章 花纹输送带和深槽型带式输送机</b> .....	15
2.1 成形花纹输送带和隔板输送带 .....	15
2.1.1 成形花纹输送带 .....	15
2.1.2 深花纹/隔板输送带 .....	19
2.2 深槽型带式输送机的原理与托辊组结构设计 .....	20
2.2.1 深槽型带式输送机提高输送倾角的原理 .....	21
2.2.2 半圆形深槽带式输送机的结构 .....	23
2.2.3 半圆形深槽带式输送机的特点 .....	24
2.3 设计计算方法及算例 .....	26
2.3.1 过渡段 .....	26
2.3.2 弯曲段 .....	27
2.3.3 功率计算 .....	28
<b>第 3 章 平面转弯带式输送机</b> .....	31
3.1 平面转弯带式输送机的发展概况 .....	31
3.2 平面转弯带式输送机的结构 .....	33
3.2.1 实现转弯的措施 .....	33
3.2.2 转弯处托辊组的结构与设置方式 .....	35
3.3 平面转弯的转弯半径 .....	38
3.3.1 转弯半径的限制条件 .....	38
3.3.2 弯曲曲率半径的确定 .....	39
3.3.3 重力分配系数 .....	43
3.4 平面转弯带式输送机的设计要点 .....	44

3.5 平面转弯带式输送机应用实例 .....	45
<b>第4章 波状挡边带式输送机 .....</b>	<b>47</b>
4.1 波状挡边带式输送机发展概况 .....	47
4.2 波状挡边带式输送机的特点及应用 .....	49
4.2.1 波状挡边带式输送机的特点 .....	49
4.2.2 波状挡边带式输送机的应用 .....	49
4.2.3 袋式带式输送机 .....	51
4.2.4 波状挡边带式输送机的发展趋势 .....	52
4.3 波状挡边带式输送机的结构 .....	55
4.3.1 波状挡边带式输送机的结构特点 .....	55
4.3.2 波状挡边输送带 .....	55
4.3.3 波状挡边带式输送机的整机结构布置 .....	58
4.3.4 波状挡边输送机的装料与清扫 .....	60
4.3.5 波状挡边带式输送机结构设计的一般原则 .....	61
4.4 波状挡边输送机的计算方法 .....	61
<b>第5章 压带式带式输送机 .....</b>	<b>64</b>
5.1 压带式带式输送机的工作原理和主要结构类型 .....	64
5.1.1 压带式带式输送机的工作原理 .....	64
5.1.2 压带式带式输送机的种类 .....	66
5.2 压带式带式输送机的结构 .....	68
5.3 压带式带式输送机设计计算要点 .....	70
5.3.1 带宽的确定 .....	70
5.3.2 弯曲段曲率半径的确定 .....	71
5.3.3 运行阻力的计算 .....	72
5.3.4 压紧力的确定 .....	72
<b>第6章 线摩擦带式输送机 .....</b>	<b>74</b>
6.1 概述 .....	74
6.2 带式输送机工作方式 .....	76
6.3 设计计算方法 .....	78
6.3.1 线摩擦多驱动带式输送机的设计基本原则 .....	78
6.3.2 设计计算要点 .....	79
6.3.3 设计计算实例 .....	81
<b>第7章 圆管带式输送机 .....</b>	<b>85</b>
7.1 概述 .....	85
7.2 圆管带式输送机的结构 .....	88
7.2.1 输送带 .....	89
7.2.2 托辊组结构 .....	91
7.2.3 框支架 .....	94
7.2.4 圆管带式输送机的纠偏结构 .....	96

7.2.5 特殊保障结构 .....	100
7.2.6 圆管带式输送机的线路布置 .....	103
7.3 过渡段的成形与长度分析 .....	107
7.4 圆管带式输送机的设计计算要点 .....	112
<b>第8章 气垫带式输送机 .....</b>	<b>114</b>
8.1 概述 .....	114
8.1.1 气垫带式输送机的原理 .....	114
8.1.2 国内外气垫带式输送机的发展概况 .....	114
8.1.3 气垫带式输送机的种类 .....	115
8.1.4 气垫带式输送机的特点与经济技术分析 .....	116
8.2 气垫带式输送机的结构 .....	118
8.3 气垫带式输送机的参数计算 .....	124
8.4 气垫带式输送机的测试方法 .....	131
<b>第9章 钢丝绳牵引带式输送机 .....</b>	<b>133</b>
9.1 钢丝绳牵引带式输送机概况 .....	133
9.2 钢丝绳牵引带式输送机各部件结构 .....	137
9.3 牵引钢丝绳的同步 .....	148
9.4 钢丝绳牵引带式输送机主要参数的设计计算特点 .....	149
<b>参考文献 .....</b>	<b>155</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 带式输送机的发展

随着全球经济的增长，带式输送机技术已经成为当代科学技术发展的前沿之一。当今的全球经济需要设计和生产“环保”型输送机，不能污染周围的环境，可以根据运输需要输送量超过 10000t/h，并且还要节约能源。输送机技术进步的一个重要特点是将基础研究发展为实用技术，进而实现商业化。

最早的带式输送机雏形是 1880 年德国 LMG 公司设计的链斗挖掘机尾部蒸汽驱动的带式输送机。1896 年美国纽约发表鲁宾斯为带式输送机的专利。在 20 世纪 80 年代之前，带式输送机技术上的重要研究成果和具有商业价值的开发工作，在很大程度上源于德国、英国和澳大利亚采矿工业的研究成果。在德国，汉诺威大学的矿山与运输机械研究所完成了一批带式输送机基础性的研究工作。而在英国，地下和倾斜输送机的输送带采用固体织物、加固编织物和钢丝绳牵引带制作。

在英国，钢丝绳牵引输送机有限公司建造了大倾角输送带，它靠被搁在输送带上的两条钢丝绳驱动来输送物料。与此成对比的是在欧洲和美国，内部张力加强的普通输送带被非常广泛地应用着。在 1980 年以前，澳大利亚、南非和加拿大采矿工业很大程度上得益于欧洲和美国的开发研究。澳大利亚、加拿大和非洲看到钢丝绳带在长距离和大张力倾斜运输方面的应用，也引进钢丝绳芯、帆布层和固体织物带。

近年来，在世界范围内带式输送机发生了重大的发展。伴随着能力和速度不断提高的现代计算机的应用，许多工程技术人员已经研制出了新的产品，同时理解了有关运输的物理过程。

在研究方面，大量重要的工作发源于 1980 年以前的德国，研究主要针对普通的输送带技术。在德国，一些创始研究人员 Viering、Lachmann、Grimmer、Alles、Oehmen、Hager 和 Funke 都致力于设计、输送机理论和运行的研究。特别是 Funke 在汉诺威完成了关于输送带特别是针对钢丝绳芯输送带动态特性的博士论文。在有关制动时间的停机方面，通过 Funke 的研究，提出了停车时高的动张力产生是由于输送带内具有很大的弹性能所致的理论。

在荷兰，Jonkers 和 Spaans 发展了一些考虑到橡胶和输送带的弹性而引起滚动阻力损耗的初期理论，而 Zur(波兰)发展了输送机理论。在英国，固体织物带类的发展(Fenner)使其在地下矿井里得到了广泛的应用，而钢丝绳牵引输送机有限公司(现在 Svedala)建造了长距离输送机。BTR 和 Dunlop 也是活跃的输送带生产商。在德国，输送带生产商 ContiTech、Clouth、Phoenix 和 Scholtz 都为欧洲市场开发了帆布层和钢丝绳芯输送带，很大程度上得到了大学研究成果的帮助。日本和韩国也都向世界市场供应帆布和钢丝绳芯输送带。

北美市场的制造商主要有 Goodyear、Scandura、GeorgiaDuck 等。Goodyear 已经在世界各地建立了输送带制造厂，包括加拿大、美国、爱尔兰、澳大利亚以及南非，让输送带的分布

在全球的基础之上，又授权被动的市场解决用户问题。设备供应商不得不开发一个比较宽广的机械范围以驱动长的、高强度的输送带。采用 Voith、Fluidrive 的液力耦合器和不同的电动机控制器实现控制起动，可以建造长距离、高升程的带式输送机。

到 1980 年，固定式输送机已经出现，并正在设计大运量、长距离的带式输送机，其具有独特的特点。不容置疑，在欧洲和美国 1980 年以前的研究，已能使公司构思大运量、长距离的运输系统。这些早期的运输系统中值得注意的例子如下：

BHP Appin Colliery(煤矿)，新南威尔士，澳大利亚：ST6300 钢丝绳芯倾斜带。

Alcoa Pinjarra，澳大利亚西部：9km 双向输送机。

Obed Mountain Coal，加拿大：12km 钢丝绳芯输送带。

Quintette Coal Ltd.，加拿大：两条长距离下输送机。

Peabody Coal Camp complex，美国：16km 钢丝绳芯输送带。

Selby Mine，英国：12km 大升程 ST7300 钢丝绳芯输送带。

Patburg and Furst Leopold，德意志联邦共和国：井下钢丝绳芯输送带。

Chuquicamata，智利：ST6000 大升程，宽，倾斜输送机。

Black Thunder Mine，美国：头部和尾部驱动系统。

SECV-Victoria，澳大利亚：水平转弯钢丝绳芯输送带。

Serpentine belt，新苏格兰：下坡转弯长距离输送机。

上面仅列出了很少一部分，它们在 1980 年之前或是已被安装，或是处在设计阶段。从这一点上，在 20 世纪 80 年代以前，新的研究需要及时解决在输送机发展形式上遇到的许多运行中的问题。

在我国，20 世纪 80 年代之前，大型带式输送机基本上依赖于国外技术。在引进、消化、合作研究的基础上，目前已经能够独立设计、制造大型带式输送机系统。国内的主要应用：宝钢原燃料输送系统，全长 57km；小龙潭煤矿连续开采工艺输送系统；首钢水厂铁矿半连续开采工艺输送系统；大柳塔煤矿主平峒输送机 4602m；山西晋城矿务局寺河矿 7600m 等。

## 1.2 通用带式输送机的研究

当考虑自 1980 年到 2000 年输送机技术的时候，有明显的新的技术发展。这从某种程度上归功于研究。研究与设备设计改进截然不同，研究被看作是来自己已经产生的基本概念的活动。研究成果的应用和认可常常要求商业的决定和冒险以便把这样的研究成果结合到工作系统当中。

### 1. 最佳理论 S 曲线起动

1981 年澳大利亚联邦科学与工业研究组织的 Harrison 提出了优化输送机起动的 S 曲线，以使输送带的瞬时应力最小化。应用此 S 曲线起动时，可以通过解析方法预测在输送带上产生的动态应力。此研究成果在 1982 年 9 月首次发表。通过对其使用微积分变换原理的数学研究，得出了 S 曲线，这是对“在一定的起动时间内应力最小问题”的一种数学解释。这些技术用来解决软起动问题和设计长距离、高带速的输送机。许多公司以各种形式把这新颖的观念应用于现代的输送机中。Nordell 提出了抛物线速度起动曲线，Dodge 的 Singh 提出了

带爬行段的起动过程。作者在动力学分析的基础上提出了梯形加速度曲线的起动过程曲线。这一结论与荷兰 Lodewijks 教授的结论类似。

## 2. 输送带横截面上振动理论

在 1980~1984 年之间, 正交各向异性薄板理论的研究对运动的输送带出现振动和弯曲现象有了第一次数学解释。Harrison 的研究第一次提供了一种准确的方法预测带式输送机的回程段振动的能量, 得出了 4 阶偏微分方程的解, 并应用于具体的薄板弹性边界; 得出了一种方法, 对钢丝绳芯输送带和织物带, 预测运输段和回程段带的振动形式需应用不同的特殊边界条件。该研究能进行自由共振设计并使由于托辊的振动产生故障的程度降低。但只有少数几家公司使用 Harrison 公开发表的研究设计自由共振输送带。在国内, 梁兆正发表了有关高速输送带弹性振动系数计算的论文, 研究输送带的振动问题。有关避免共振的简化方法已经编入《煤矿带式输送机设计规范》。

## 3. 滚动损耗与运行阻力的计算方法

输送带的张力受许多因素控制, 如提升高度、长度、带的刚度、压陷、输送带经过托辊的挠度以及附加阻力。关于这方面, 在 20 世纪 80 年代以前已有许多文献, 如 DIN22101 和 CEMA, 还有输送带厂商的内部计算手册。这些文献很大程度上利用实验结果确定输送带的工作点, 如托辊级别、弯曲效果、倾斜效果以及局部的或整体的摩擦力。

在 1980 年到 2000 年期间, 进行了预测长距离和转弯输送机摩擦力的新研究。纽卡斯尔大学(Harrison 等)研究了物料和输送带弯曲的影响, 并且发表了研究成果。在这个时期, Zur、Alles、Hager、Betz、Spaans、Jonkers、Nordell、Lodewijks 以及许多其他人写的文章主要体现了对科学的贡献, 即对橡胶在托辊上的压陷阻力受粘弹性影响的科学贡献。

Spaans、Harrison、Zur、Nordell、Hager 每一个人都说明研究主要是对弯曲和有关滚动压陷损耗的橡胶特点影响的理解。在汉诺威大学, Hintz 作的博士论文(1993 年)考虑到了与压陷损耗有关的复杂情况。大多数的该项研究能够使得模型系统在设计早期得到仔细检验, 因而使企业更有信心。因此, 已经看到了长距离输送机、有些带有水平或垂直转弯的长距离输送机以及长距离、大运量下输送机的出现。

作为研究成果应用的例子, 有许多著名的系统就是应用了上面论述的研究成果。如: 一条由 Man Takraf 公司所设计的 16km 长、高强度钢绳芯带输送机, 在美国科罗拉多州的 Henderson 矿使用。该输送机比标准设计的输送机具有比较低的滚动阻力损耗。产生此结果的两个因素是: 很低的托辊阻力损耗和复合橡胶带(由 Clouth 制造)具有低的压陷阻力损耗。另一个例子(Channer, 澳大利亚), Nordell 和 Beckley 对此系统进行了咨询, 其全部的 DIN 阻力系数在 0.0098~0.011 之间。这些低阻力的输送机要求较低的电动机功率、因而需要较低的输送带强度, 因此, 对于一条给定的输送带, 它能使用更长的时间。美国输送机制造商协会(CEMA)所编辑的《散状物料带式输送机设计》(第 6 版)首次发表了 CEMA 带式输送机设计的通用方法, 在对 CEMA 的传统计算方法改进的同时, 引入了输送带的粘弹性性质计算输送机运行阻力。该方法的输送机功率计算精度可达  $1100\% \pm 10\%$ 。

## 4. 动力学分析方法

现代机械动态设计是在产品的研究和开发过程中, 对机械产品的运动学问题、动力学问题, 以及与此相关的动态可靠性问题、安全性问题、疲劳强度和工作寿命等问题, 进行分析和计算, 以保证所研究和开发的设备具有优良的结构性能和工作性能。

大型带式输送机涉及到起动、停机、横向振动、输送带跑偏等一系列动力学问题。传统的带式输送机设计计算方法是静力学为基础的静态设计方法，而将以动力学为基础的设计方法称为动态设计方法。

带式输送机的起动、停机过程的动态设计采用的是，将输送带按弹性或粘弹性性质来研究输送机的起动和停机过程中输送带和输送机主要部件的瞬态动力学行为，并对初步设计检验的动力学方法。有多种方法可以解决在输送带中弹性应力传播的问题，这些方法包括波动模型、质量-弹簧模型、边界元素模型和有限元/微分方法。每一种方法都有其数学根据。例如，波动模型就有必要考虑全部应力波的傅里叶成分，而质量-弹簧模型的解决方案取决于产生应力各个模态的幅值；对于有限元模型，当运用大量的运算来模拟应力的时候若元素边界错误就可能出现问题，并且元素的模数会变成临界的模数。因而，研究人员们期望通过研究不同的方法来解决此问题。应用波动模型需要较多的数学基础，而质量-弹簧模型更易于用速度快、内存大的计算机来处理。

在1980~2000年之间，出现了有关这个主题值得考虑的新研究。1973年，汉诺威大学的 Funke 所发表的博士论文研究了矿山输送机动态特性。1984年在纽卡斯尔大学又有一篇有关该课题的博士论文(Harrison)，该论文对输送带的振动理论和弹性波理论都进行了研究，并应用于运行、起动和停车问题。1985年，德国的 Schulz，1996年，荷兰代夫特大学的 Lodewijks 分别完成了关于输送带动力学的博士论文。

在国内，有关带式输送机动力学分析的问题也得到广泛的重视，包括太原重型机械学院、阜新矿业学院、中国矿业大学等单位都进行了一些理论方面的探索。作者完成了博士论文《大型带式输送机动态过程的研究》(1996)，之后完成了动力学分析软件的开发，并于2001年对该软件进行了进一步的开发，建立了完整的动力学模型和稳定的数值分析方法。该软件已经在十余项大型带式输送机实际工程项目中应用。

动力学分析能估算包括在起动或停车过程中有关结构、滚筒和输送带载荷的力的值。对于长距离大张力的输送机，该方法是可靠性设计的重要部分，这已被工业界广泛地采用。通过动力学研究已经开发出许多的计算机程序。

(1) 波动方程求解 在1982年，Harrison 第一次阐述了输送机带的波动方程求解。它要求找到输送带的承载分支和回程分支承受不同载荷时波动方程的特征函数，并将静态解(稳定运行张力)和动态解叠加。模型依赖于最初的研究，允许输送带应力波速的精确预测。波动模型不能很好地处理运动的边界(拉紧)，运用波动模型需要特殊的条件。不过，波动模型作为支持设计的工具已经被应用了许多年。

(2) 质量-弹簧解 输送带质量间通过粘弹性联系的模型由 Nordell 等在1984年首先提出。如同其他的模型，在其边界单元需要相应的应力和张紧力，这种模型可能出现计算不稳定、产生错误的预测。Morrison 的 WBM 讨论了这种不稳定情况。弹簧-质量模型在处理拉紧装置方面优于波动模型。世界上很多大公司都在应用这种方法或者开发出计算机程序。

### 5. 输送带监控研究

1980年由 Harrison 在 CRIRO 的应用物理部最先发明了一种新的测试方法并获得专利，该方法可以在非接触状态下对钢丝绳芯输送带进行检测，监测断绳和钢丝绳接头，预报可能发生的损坏。

第一次对钢丝绳芯输送带实现非破坏测试(non-destructive test-NDT)是在澳大利亚(1979

年)。1982~1987年间,这种方法被应用于德国、南非、加拿大、美国和一些其他地区的采矿业。这种技术也广泛用于其他的工业领域以提高可靠性。根据这一研究,应用信号分析理论进一步发展了标准的测试和检验方法,实际上已经用于钢丝绳制造的产品质量检验。其美国专利为4439731和4864233。

应用这项技术,使对有危险的和高张力钢丝绳芯输送带的监测成为可能。钢丝绳处于输送带内就可以对输送带的安全性能进行检验。通过磁场状况和接头条件覆盖层磨损情况可以检测出各种制造缺陷,例如钢丝绳的布置间距。

#### 6. 接头测试与测试装置

这方面的研究是从3个方面对接头进行研究,特别是对高强度(钢丝绳芯)输送带。当前研究的重点是对大型接头设计的理解、破坏试验装置和优化接头强度。包括:

- 1) 接头破坏试验装置: Harrison 1981—1989。
- 2) 几何和机械设计: Von Der Wroge (Dr. Ing. 1991)。
- 3) 动力学效应测试和研究: Flebbe, Hager, Nordell。

最早开始接头动力学强度研究的是汉诺威大学,其研究内容是确定接头寿命和寻求降低输送带强度的方法。他们建立了一个实验台用于研究和测试接头疲劳强度和寻求提高接头强度的方法。

目前用理论进行接头设计只有有限的实例,但工业界有提高接头强度的要求。此外,对粘接和等强度问题也进行了广泛的研究。Nordell用有限元分析(FEA)研究了各种不同钢丝绳接头设计的应力分布情况。

#### 7. 输送带冲击和缓冲的研究

硬岩对输送带的冲击是造成输送带纵向撕裂和降低输送带寿命的重要原因,特别是在我国,由于矿石的品位较低,因此矿物的硬度高于国外矿石。作者在硕士学位论文中进行了研究,提出了一种在托辊组中托辊间增设缓冲弹簧的缓冲方法,并进行了实验研究。所进行的主要工作包括

- 1) 托辊等效质量的理论计算。
- 2) 比较了各种缓冲形式的效果。
- 3) 提出了中间增设弹簧的缓冲措施。

#### 8. 输送带翻转

输送带的翻转是将普通输送机的输送带进行翻转,以保证输送带的承载面保持和托辊的接触,它对控制平面转弯的轨迹可以获得良好的效果,保持输送带和托辊之间的摩擦特性不变。输送带翻转还可以避免粘在输送带表面的物料在沿线撒落,这对保护环境和穿越公路和河流都具有意义。很多输送带制造商都给出了翻转的长度。一些研究输送带翻转区段输送带的强度和挠度问题。上面列出了输送带翻转的重要特征,可以把输送带的翻转看成是现代输送机的一个方面。

#### 9. 滚筒的发展

滚筒强度的分析与设计和寿命分析是输送机设计的一个重要方面。供应商中有很多从事这方面的研究者。King的一篇论文讨论了滚筒设计问题,它对研究者具有很好的参考价值,并且回顾了滚筒强度理论。CEMA已经改进了滚筒强度的计算方法。邱向军提出一种新的改进的传递矩阵方法(MTM)分析滚筒应力,其结果和用有限元模型(ANSYS)方法得到的结果

非常吻合，并可以大幅度地减少计算时间。

### 1.3 特种带式输送机的发展

通用带式输送机的主要特点是托辊安装在固定的机架上，机架是落地式的；输送带为平型光面、托辊的槽角为  $35^\circ$  左右。通常情况下倾斜向上运输不超过  $18^\circ$ ，向下运输不超过  $15^\circ$ 。为适应工业应用的需要，发挥带式输送机本身的特长，出现了大量的新型带式输送机。将不属于通用带式输送机，但仍采用输送带作为承载元件的输送机统称为特种带式输送机。在本节中所描述的各种输送机都是通用输送机功能的扩展，它们适用于各种特定场合。这些研究和发展的技术在很大的范围内满足了现代物料搬运的需要。

特种带式输送机种类繁多，如何对其进行准确分类尚需进一步研究。这里仅从特种带式输送机开发目的的角度将其划分为大倾角与垂直提升、降低输送带张力、降低输送机运行阻力（改变输送带支撑方式）、密闭输送物料、空间转弯 5 类。下面对各类特种带式输送机进行讨论。需要说明的是，下面所列的一些特种带式输送机在原理上可以归入其中的几类，为避免重复，仅将其归入开发时最主要的目的。例如，圆管带式输送机既可以实现物料的密闭输送，也可以实现大倾角输送物料，也能够进行空间转弯，在下面分类中，将其归入密闭输送物料类中。

#### 1.3.1 大倾角与垂直提升

大倾角与垂直提升类按其可以达到的输送物料的最大倾角顺序，有花纹带、横隔板式、深槽型、压带式、波状挡边、口袋式 6 种特种带式输送机。

##### 1. 花纹带和横隔板式

花纹带输送机是将光滑的平型输送带的表面在输送带的制造过程中增加花纹以减缓物料的下滑趋势，由于结构的原因，花纹输送带宜输送流动性好、不易粘结在输送带上的物料，例如粮食颗粒；横隔板式是在输送带上采用机械固定的方法连接隔板，以保持物料和输送带一起运动，由于需要考虑带有横隔板的输送带在承载段形成槽形，经过滚筒时为平型，而在回程段还有托辊支撑的问题，横隔板式有多种结构形式。可以认为横隔板式是波状挡边带式输送机的雏形。

##### 2. 深槽型带式输送机

深槽型带式输送机是在充分保持通用带式输送机优点情况下，增大输送物料倾角的一种输送机，它仅改变输送机托辊组的槽角或托辊组中辊子的数量，通过辊子经过输送带对物料的挤压来实现大倾角输送物料。深槽型输送机提高输送物料的倾角受到物料性质和料流的影响。作者在对挤压原理分析基础上，结合输送带的成槽性提出了半圆形深槽带式输送机的设计理念。

##### 3. 波状挡边和口袋式带式输送机

波状挡边输送机是将横隔板式标准化而形成的，它在设计思想上也发生了变化，即保证物料的输送能力并不限于将承载段的输送带设计成槽形，而是可以通过增设挡边的方式来提高物料的截面积，从而带来了一系列结构上的简化。出现了 Flex Well(大倾角输送)、Flex Fast(高速波状挡边)、Flex Turn(实现空间扭转)等形式。

另一种垂直提升方式是内口袋式(Pocket Lift)，它是用口袋将输送物料保持在输送带的下面(图 1-1)，它是采用两片输送带作为牵引元件，而将口袋固定在两片输送带上。图 1-2 是它的两个应用实例。其提升高度达 203m。

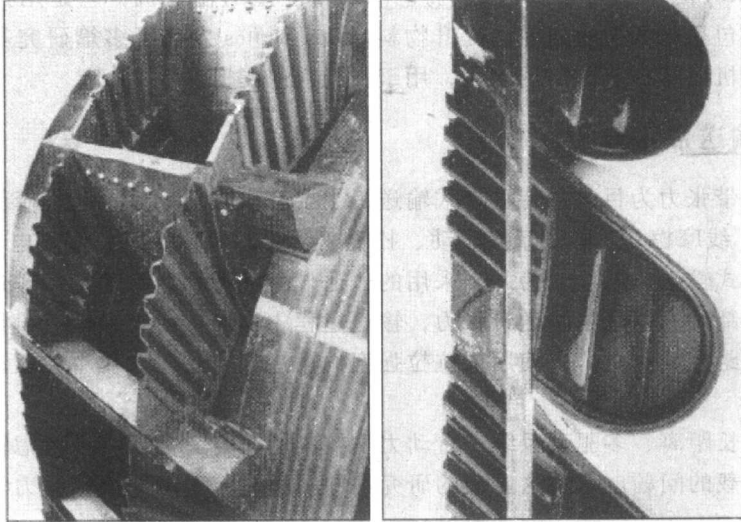


图 1-1 口袋式的输送带

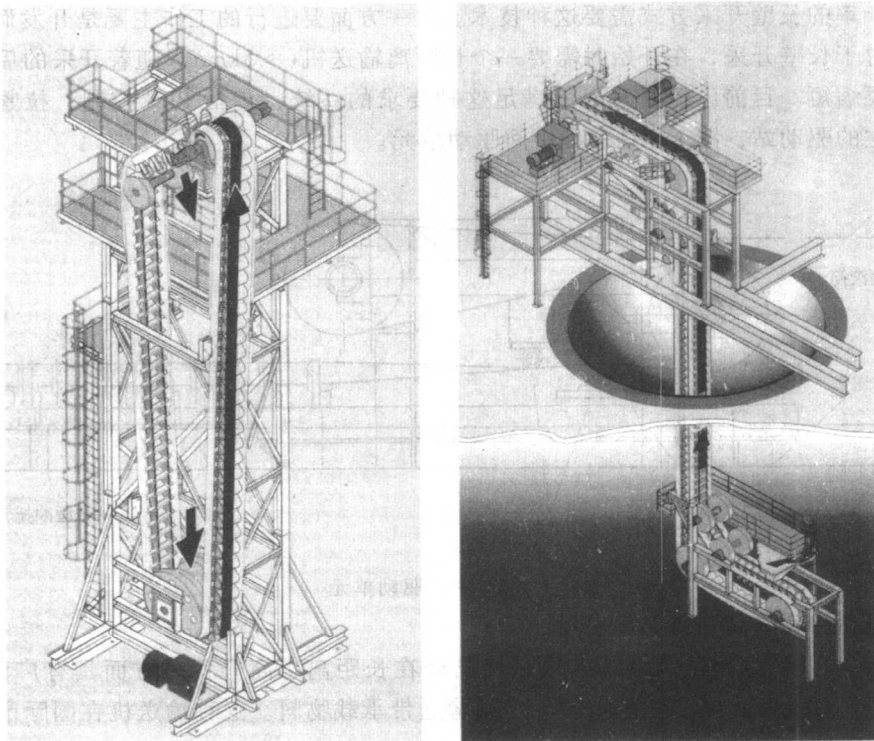


图 1-2 典型的波状挡边和口袋式输送机结构

#### 4. 压带式带式输送机

用辅助带对物料施加压力，可以增大输送带的倾角，其输送物料的结构形式类似于三明治，通过上下两条输送带将物料包裹在中间。其成功的应用主要是美国大陆公司的 HAC (High Angle Conveyor, 大倾角带式输送机)。Sandwich 型的输送机，它是用托辊压上覆盖的输送带，将物料包裹在两条输送带内提升物料。Dos Santos 发表了多篇研究与介绍其应用的论文。这种输送机已经在美国广泛使用，用于长距离的提升。

### 1.3.2 降低输送带张力

以降低输送带张力为目的的特种带式输送机主要有驱动、钢丝绳牵引、钢丝绳波状挡边、带-链式、线摩擦、T形带摩擦驱动、托辊驱动、胶轮驱动式、直线电动机驱动 9 种。

助力驱动带式输送机已经成为井下采用的普通设备，特别是在美国。输送机的驱动布置在输送带的多个部位上以减小输送带张力，输送过程中也可以实现输送机自行卸料。采用这种方法建造的长距离输送机可以使用低抗拉强度的输送带，用以取代单独驱动时需要采用的强力输送带。

一些对这种长距离、多驱动系统进行动力学控制的研究，需要特别考虑输送机的工作条件，例如局部有载的问题。有关这方面的研究集中在驱动装置的摩擦和动力学控制方面。

#### 1. 多点驱动

输送机系统驱动、制动装置的布置设计的重要准则就是降低输送带的最大张力，除采用头、尾驱动方式外，采用中间驱动是降低输送带最大张力的有效途径。

高生产率的长壁开采方式需要这种技术。这一方面要进行的工作主要是开发而不是纯粹的研究。对于长壁开采，在开始时需要一个长距离输送机 (>5km)，随着开采的后退输送机的长度需要缩短。目前已经开发出了满足这种要求的系统，包括 PLC 控制、拉紧装置、仓储环和独立的驱动站，图 1-3 是一种中间驱动单元。

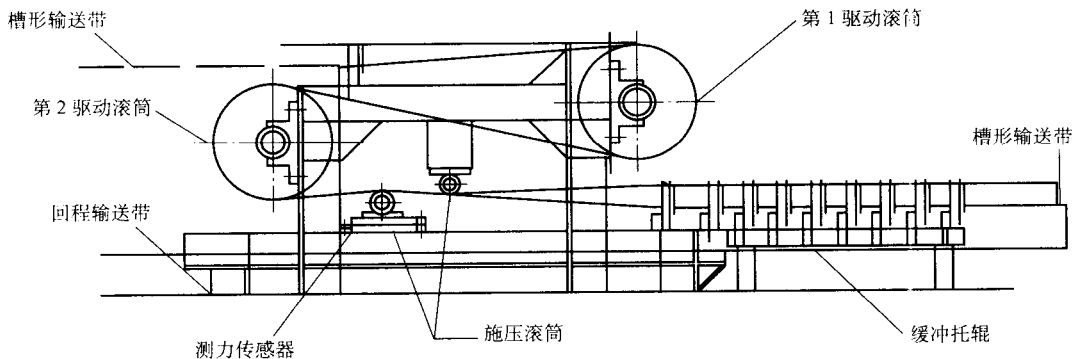


图 1-3 中间驱动单元

#### 2. 钢丝绳牵引与钢丝绳波状挡边

在 1980 年以前钢丝绳牵引带式输送机已经在长距离、高升程等方面具有广泛的应用。这种输送机用两条钢丝绳作为牵引元件，用输送带承载物料。这种输送机在国际市场上有很多散状物料搬运的记载。

钢丝绳牵引带式输送机能够广泛应用于矿山和物料搬运企业的原因是：适用于长距离输



送,在地形限制下可以实现水平转弯,输送带维护方便,易于更换。在过去的20年里,钢丝绳牵引带式输送机公司(现在的Svedala)在下面几个方面发展了钢丝绳牵引带式输送机系统。包括采用多橡滚筒,用以减小噪声;PVL输送带,用以预先的成槽,以提高物料的稳定性和;输送带加强网;水平曲线单元,研究绳的覆盖层和纺纶加强绳。

下面列出的是部分具有代表性的钢丝绳牵引带式输送机系统。

Worsley Alumina, 澳大利亚, 单机长度30km和20km, 是目前单机长度最长的系统。

Selby Mine, 英国, 是一个长距离、大提升高度的系统, 它相当于通用带式输送机的钢丝绳芯输送带强度ST7100。

Norfolk Southern, 美国, 是一条长距离、大垂直曲线的系统。

Line Creek Mine, 加拿大, 一条10.6km下运曲线输送机系统。

国内钢丝绳牵引带式输送机的应用主要在运量大、单机运距不太长(相对于钢丝绳芯带式输送机)的场合发挥作用,特别是运货、运人双运的情况下。

一种新型的钢丝绳输送机,它是波状挡边带式输送机和钢丝绳牵引带式输送机的综合,如图1-4所示。当波状挡边输送带承受较大张力时,对波状挡边和基带之间的粘接强度提出了更高的要求,该种输送机集合了两种类型的优点,可以实现长距离的越野输送,特别在通过山谷地带时,不需要在山谷中架设支撑。

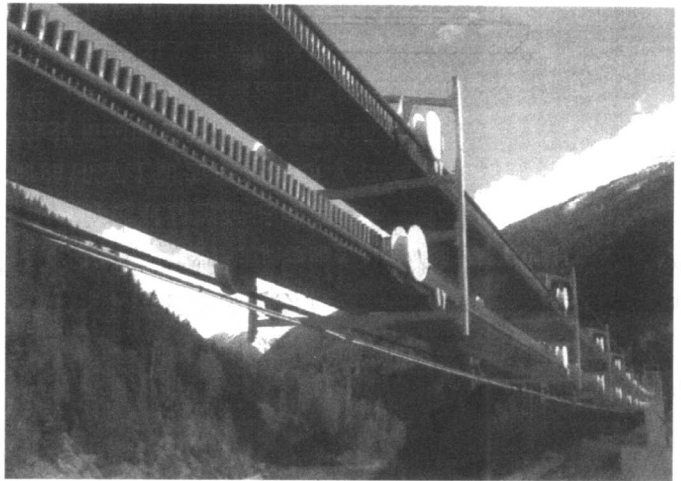


图1-4 钢丝绳波状挡边输送机的输送段

### 3. 带-链式

带-链式带式输送机与钢丝绳牵引带式输送机的区别在于:其牵引机构是输送带和(或)带有托架的链条。通过链传动降低输送带的张力,并可以实现水平转弯。由于引入了链条作为传动元件,可以构成具有固定滑动支座、固定托辊、综合固定支座、行走支座、输送带和链条分别驱动等多种形式。这种形式的输送机的研制主要集中在前苏联。图1-5为带-链式输送机。相对于通用带式输送机,其结构复杂,成本较高。

### 4. 线摩擦、T形带摩擦驱动、托辊驱动、轮胎驱动式

带式输送机运行阻力的产生是在整个输送线上,通过在输送机沿线设置驱动,可以降低输送带张力。线摩擦、T形带摩擦驱动、托辊驱动、胶轮驱动式都属于这种方式。

线摩擦方式是在主输送带下设置传动带,采用多驱动。前苏联在1920年左右就提出了这种方式,继而德国对其进行了试验研究,英国的道梯-麦柯公司进行了研究。国内较早应用的是在1974年上海港7区的线摩擦驱动带式输送机。从应用看,国内的带式输送机的规格都是应用运距较小、运量较低的情况。

德国的克虏伯公司对210km长的输送机所作的设计考虑了使用具有驱动辊子的方式,