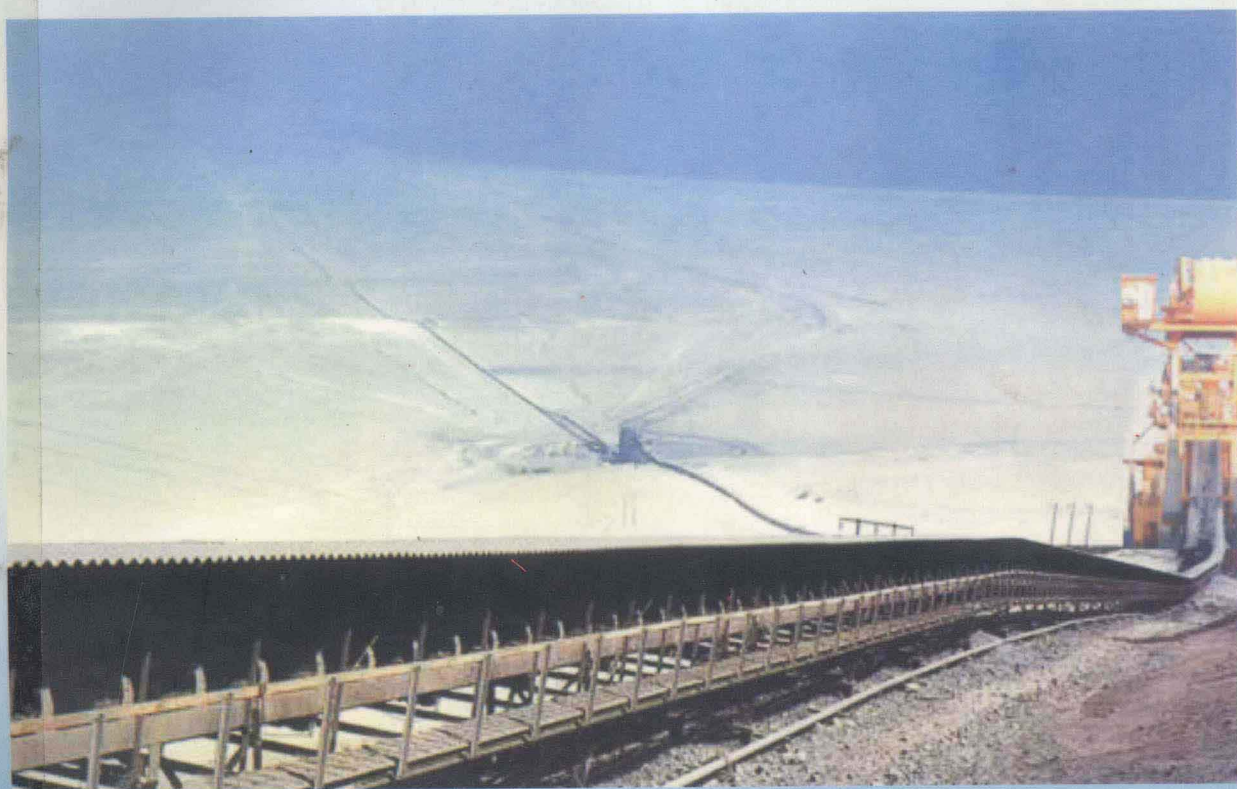


带式输送机运行 状态分析及监测

王广丰 谭继文 著



 吉林大学出版社

带式输送机运行 状态分析及监测

王广丰 谭继文 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

◎ 吉林大学出版社

内 容 简 介

本书对强力带式输送机的稳态和动态运行的基本特性参数及其影响因素以及设计参数等进行了分析,在此基础上对带式输送机运行状态的监测技术进行了综合,并重点研究了一种输送带纵向撕裂监测和输送带强力纠偏系统。

全书2篇共8章,第1章:带式输送机发展现状;第2章:输送机运行稳态特性参数;第3章:输送机运行动态特性参数;第4章:输送带纵向撕裂监测;第5章:纵向撕裂监测软件系统;第6章:输送带纠偏监测系统;第7章:输送带纠偏监测软件系统;第8章:输送机运行状态综合监测。

本书可作为机械电子工程专业本科生教学参考,也可作为同专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

带式输送机运行状态分析及监测/王广丰 谭继文 著.-长春:吉林大学出版社,2006.5

ISBN 7-5601-2884-X

I.带… II.①王… ②谭… III.矿山运输与设备-带式输送机运输-分析、监测 IV.TD528*.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 078929 号

带式输送机运行状态分析及监测

著 者:王广丰 谭继文

封面设计:田 雨

责任编辑:王亦农

责任校对:熊永超

出版发行: 吉林大学出版社 吉林音像出版社

(吉林省长春市人民大街 4646 号 邮政编码: 130021)

网 址: www.hdhcb.com.cn

E-mail: jrbj88@163.com

印 刷: 内蒙古民族大学印刷中心

开 本: 787 × 1092 毫米 1/16

印 张: 11

字 数: 280 千字

版 次: 2006 年 9 月第 1 版

印 次: 2006 年 9 月第 1 次

印 数: 1 - 1000 册

ISBN 7-5601-2884-X

定价: 26.00 元

(版权所有 侵权必究)

前 言

带式输送机的发展已有近200年的历史。19世纪末出现的槽型结构的带式输送机确定了当代带式输送机的基本型式。从20世纪50年代开始,由于全球经济的快速发展,使得涉及数学、机械和化学工程、物理、电工学和计算机技术等多学科带式输送机技术在世界范围内取得了巨大的进步,先后出现了强力型带式、大倾角上、下运、双向输送、水平垂直转弯和管状等多种输送机型式。随着橡胶技术和电子技术的迅速发展,输送带的制造、安装水平不断提高,各种检测、保护装置被用于带式输送机,现代计算机在带式输送机系统中的应用,使得长距离、大运量带式输送机得到了迅速发展。由于输送带的粘弹特性,传统的刚体力学计算、设计法应用于长距离、高带速的大型带式输送机系统中时与实际运行工况有相当大的距离,由此带来一系列问题,如:输送带和传动滚筒之间的打滑加剧输送带和滚筒的磨损,严重时会使输送机起动失败;输送带某些点的张力过小,在托辊间输送带的挠度过大,有时甚至会出现输送带重叠而导致停机事故等。带式输送机向更快、更宽、更大型化的方向发展,输送距离也随之越来越长。传统的带式输送机设计方法将输送带看作刚体,认为输送带各质点同时加、减速,事实上,输送带是具有粘弹性特性的粘弹性体,在其全长上输送带各点的速度、加速度、张力具有动态特征,是时间的函数。这种动态特性对低速、短距离输送机影响不太大,但长距离、高速度带式输送机运行时,这种动态现象就会明显地表现出来,尤其是在起、制动等非稳定工况下,输送带各点的动力学参量变化很大,对输送机产生巨大的瞬时冲击,造成输送带和接头断裂、降低传动装置等元部件的疲劳寿命。为了避免这些事故的发生,传统的解决办法是增大输送带的初张力、提高输送机的驱动功率以及输送带的安全系数,这样就大大增加了带式输送机系统的投资成本。

从上世纪50年代起,德国、英国和澳大利亚等采矿业和港口运输业发达国家的一些学者对此进行了研究。并观察了输送带的纵向应力波传播特征及其对输送带张力和驱动力的影响,在起、制动等非稳定工况下驱动系统的特征和输送带的张力等。并在此基础上建立了带式输送机动态分析技术的基本理论。在此基础上设计的输送机整体上更为合理,运行更安全可靠。与此同时随其它综合技术的发展和进步也产生很多先进设施,如各种软起动系统或装置;系统运行状态监测装置如输送带纵向撕裂监测装置、输送带纠偏监测装置、输送带打滑监测装置、火灾监测装置及断带保护装置等。

本书重点对强力带式输送机的运行状态参数及系统监测技术进行综合性分析,并详细重点研究了一种输送带纵向撕裂和强力纠偏监测装置。由于作者能力和水平所限,难免出现不足和错误,殷切希望读者批评指正。

作 者 2006年9月

目 录

第一篇 带式输送机运行状态分析.....	1
第 1 章 带式输送机发展现状	1
1.1 带式输送机应用状况.....	1
1.2 关键技术及相关研究.....	1
1.2.1 动态特性参数研究.....	1
1.2.2 软启动装置的研究现状.....	2
1.2.3 辅助装置的发展.....	4
1.3 设计方法的发展.....	5
1.3.1 高性能部件的应用.....	5
1.3.2 输送带安全系数的合理确定.....	6
1.3.3 动态过程控制技术.....	6
第 2 章 输送机运行稳态特性参数	9
2.1 基本稳态特性参数.....	9
2.1.1 带宽及敷设倾角.....	9
2.1.2 弯曲技术参数	10
2.2 稳态运行多滚筒驱动力分配	22
2.2.1 刚性连接滚筒驱动力分配	22
2.2.2 分立多点驱动滚筒驱动力分配	28
第 3 章 输送机运行动态特性参数.....	35
3.1 系统基本动态特性参数	35
3.1.1 动态特性研究的基本内容和方法	35

3.1.2 输送带特性参数	37
3.2 输送机动态分析基本理论	40
3.2.1 连续系统动态理论	40
3.2.2 离散系统动态理论	46
第二篇 带式输送机运行状态监测	53
第4章 输送带纵向撕裂监测	53
4.1 发展和应用现状	53
4.2 电磁监测装置	56
4.2.1 电磁监测方案	57
4.2.2 谐振分析	61
4.2.3 电磁耦合分析	62
4.2.4 信号波形仿真	66
4.3 监测系统硬件组成	69
4.3.1 硬件系统基本功能	69
4.3.2 系统工作方式	70
4.3.3 感应线圈的埋设	70
4.3.4 系统的性能指标	71
4.4 线圈位置检测器	84
4.5 微处理器及外围设备	86
第5章 纵向撕裂监测软件系统	93
5.1 系统运行模式	93
5.2 感应线圈地址表	94
5.2.1 模/数转换处理	95
5.2.2 位置传感器中断	95
5.3 系统监测主程序	96
5.4 系统软件抗干扰	100

第 6 章 输送带纠偏监测系统	103
6.1 输送带纠偏监测现状	103
6.2 纠偏理论分析	106
6.3 纠偏系统机械结构	109
6.4 信号处理系统	111
第 7 章 输送带纠偏监测软件系统	127
7.1 软件系统总体方案	127
7.1.1 系统通讯	127
7.1.2 通信协议	127
7.2 下位机软件流程	130
7.3 上位机软件流程	139
7.3.1 系统方案	139
7.3.2 系统抗干扰	141
第 8 章 输送机运行状态综合监测	149
8.1 断带监测与保护	149
8.1.1 常用的断带监测方法	149
8.1.2 CBM 输送带检测器	127
8.1.3 国内常用的断带保护器	158
8.2 输送带打滑及火灾等监测	160
8.2.1 输送带打滑监测	160
8.2.2 输送带火灾监测	160
8.2.3 输送带张力监测	162
参考文献	163

第一篇 带式输送机运行状态分析

第1章 带式输送机发展现状

1.1 带式输送机应用状况

随着国民经济的飞速发展,矿山、建材、化工、港口、粮食、电力、煤炭等部门对散状物料的输送提出了新的要求,要求带式输送机以长距离(指单机输送长度,国外最长达15000 m,国内最长达8984 m)、大运量(高带速和大带宽)和大倾角输送物料,同时提出无公害环保输送散体物料的要求。因此,带式输送机已不只是厂内及车间与车间之间的输送设备,而成为可以与汽车运输相竞争的输送设备。无论国外还是国内的建材及矿山行业,在这2种运输方案的对比选择后,最终还是较多地选择以长距离、大运量的带式输送机代替汽车运输的方案。其原因是采用汽车运输不仅要修建公路,购买汽车一次性投资大,而且日常的公路和汽车维修费用也很高;带式输送机输送散状物料是连续的物料流,生产效率高。目前,国外最大带速已达 12 m/s 。国内的最大带速达 5.8 m/s ,最大输送量 8400 t/h 。当然,增加输送带的宽度也可以提高输送量(国外采用的最大带宽为 3300 mm),但增加带宽使整机所有相关尺寸增大,增加了设备的总投资。特别是输送带的成本要占整机成本的 $30\sim 50\%$,而且距离越长,运量越大,占的比例就越大。同时,大带宽需要相应的硫化设备用于输送带和输送带接头的硫化。因此,我国目前所采用的最大带宽为 $2200\sim 2400\text{ mm}$ 。今后的发展趋势是提高带速以提高输送量。当然,提高带速受到托辊转速(主要是轴承转速)的限制,国外生产的轴承转速可达 1000 r/min 。而国内设计规范中规定不大于 600 r/min 。如何生产出与托辊配套的高质量轴承也是轴承行业需要深入探讨的课题。

近年来,通过引进国外先进国家的带式输送机整套设备及技术和国内广大科研技术人员的共同努力,设计和制造长距离、大运量带式输送机的水平已经可以满足国内市场的需求,但是一些关键技术尚需引起重视并加以深入研究和开发。

国内投入使用的部分长距离、大运量的典型带式输送机见表1-1和表1-2。目前天津港散货物流中心到南疆煤码头的输煤带式输送机的单机长度是国内最大的,其输送距离 $L=8984\text{ m}$,功率 $N=4\times 1750\text{ kW}$,该机在尾部进行水平转弯,其半径分别为 3000 m 和 4000 m ;天津港的另一台输煤带式输送机的输送量最大, $Q=8400\text{ t/h}$,输送距离 $L=1051\text{ m}$ 。表1-2所列国内上海梅山钢铁厂使用的圆管带式输送机的输送距离最长, $L=2230\text{ m}$;秦皇岛港矿石码头使用的圆管带式输送机的输送量最大, $Q=4500\text{ t/h}$;而贵州瓮福肥厂使用的圆管带式输送机是目前国内线路布置最复杂的输送机,沿线共跨过4个山头 and 1条河,绕过2座山,穿过2个建筑群,水平面转弯3个,垂直面转弯6个,空间转弯3个。

1.2 关键技术及相关研究

1.2.1 动态特性参数研究

长距离、大运量带式输送机起、制动过程的计算不能采用常规的刚体动力学计算方法,

而必须考虑到输送带的特性参数(质量、弹性、阻尼等),在空间离散化的条件下,可以使用有限元的方法进行处理。带式输送机启动时加速度引起电机功率增加,输送带强度增加28.4%,结构件载荷增加。突然停车时加速度过大,张力波的振荡带来了动态振动,对水平带式输送机引起局部应力过低,输送带下垂,造成输送带撕裂、托辊破坏及物料外泄;对倾斜带式输送机则引起制动滚筒两侧高、低应力比过大,而造成输送带打滑,导致输送带逆转并沿斜面下滑。上述问题需要采用动力分析的方法加以解决。目前,澳大利亚、美国、法国、意大利等国家在动态分析研究方面处于国际领先,它们各自都开发了动态分析软件,并在多台长距离、大运量带式输送机的设计中应用,取得了满意的效果。国内东北大学开发了动态分析研究方面的软件,通过对几条长距离、大运量的带式输送机进行动态分析,并与用国外软件进行动态分析的结果相比较,其计算结果差距不大,通过现场调试及检测与实际情况基本相符。除东北大学以外,还有太原科技大学、辽宁工程技术大学等院所也进行动态分析研究的工作,但总体研究水平与国外发达国家相比还有较大的差距。

1.2.2 软起动装置的研究现状

为了适应长距离,大运量带式输送机的特殊要求,输送机的驱动装置应具有良好的启动特性,近年来国内外研究开发了多种形式的软起动驱动装置(或系统),并在不同工况条件下得到应用。

(1) 调速型液力耦合器

调速型液力耦合器可以延长起动时间、改善输送机起动性能。液力耦合器安装在电机和减速器之间。调速型液力耦合器存在的主要问题是:

- 1) 一般有3%~5%的滑差,此时具有3%~5%的传动功率损失,而且输送机械大都长时间工作,使耦合器发热量大,浪费大量的能量;
- 2) 无法实现要求传动比为1的直接传动运行工况;
- 3) 在起动过程中始终存在一个不稳定的过渡区,起动性能不够理想。

(2) 变频调速

变频调速通过改变定子的供电频率以改变电动机的同步转速,当交流电源的频率由小到大变化时,电动机转速也随之由小到大变化,只要控制频率变化范围以及频率变化的时间,就可使输送机按照设定的速度曲线平稳地起动,实现输送机的软起动。变频调速功率较大、调速范围宽、精度高,有较好的软起动性能,是交流电机较理想的调速方法。这种技术近几十年来随着电子技术的进一步发展和可控硅生产技术的逐步成熟而开始应用。目前国内外正在加紧研制高性能、高压、大容量、可满足防爆要求的变频器。但由于带式输送机使用的特殊性,大多采用高压、大容量鼠笼电机,同时要解决一系列电气问题,使其线路复杂,在这种情况下,采用高压变频器投资大,价格高,可靠性差,而且需要采用特殊电机;同时变频调速会产生强大的信号干扰,影响其他电气控制设备的正常工作。这些都限制了变频调速在某些场合中的应用。

(3) CST可控起动系统

CST是美国Rockwell Automation / Dodge公司研究和开发的一种采用液体粘性传动技术的机械可控起动系统,能较好地实现软起动要求,使输送带、滚筒、托辊等的可靠性及寿命大大提高。该装置的优点是起动时调速精度高,可以变速运行。其缺点是:

- 1) 行星减速器与液粘传动装置结合,相互影响;
- 2) 制造难度大,安装调试复杂;
- 3) 对油的粘度与清洁度要求特别高,否则影响齿轮寿命;

4) 维护复杂, 费用高;

5) 摩擦片直径大, 必须依赖进口。

20世纪80年代初美国研制成功了用于带式输送机的CST系统, 90年代初开始在我国推广应用。国内北京理工大学、上海交通大学、北京航空航天大学、山东科技大学、吉林大学(吉林工业大学)等单位进行了相关的技术研究并开发了油膜离合器、液体粘性调速装置等, 在煤矿、建材等行业得到应用, 并取得良好的效果, 其设备投资比采用CST减少20%~30%。

表1-1 国内普通带式输送机的部分应用

使用地点	物料	运量(t/h)	带宽(mm)	带速(m/s)	机长(m)	功率(kW)	起动方式	拉紧方式	输送带型	制造单位	时间
晋城煤矿	原煤	2500	1400	4	7600	37800	CST	电动	st2000	沈矿	2001
天津港	煤	6600	1800	5.6	8984	471750	变频	绞车	st3150	华电	2002
天津港	焦炭	2000	1600	3.6	7600	47400	变频	绞车	st1000	中港	2002
驻马店水泥厂	石灰石	1600	1200	3.5	8140	57560	CST	液压	st2500	衡阳	2004
大连港	铁矿石	6250	1600	3.15	520	67250	液马达	重锤	st500	沈矿	2003
天津港	煤	8400	2200	5	1051	37500	YOXVS IIZ	重锤	st1600	沈矿	2003
天津港	煤	6000	1800	5.8	495	27500	YOXVS	重锤	st100	沈矿	2003
盘固水泥厂	石灰石	1500	1200	2.5	4258	37355	液力偶合器	液压绞车	st2500	沈矿	2004
向家坝水电站	砂石	3000	1200	4	8298	47900	液力偶合器	液压绞车	st3150	沈矿	2004
龙滩水电站	石灰石	3000	1200	4	3950	37560	CST	液压绞车	st2000	沈矿	2003
榆泉煤矿	煤	2000	1400	4	6726	37710	CST		st3150	山矿	2003
大柳塔煤矿	煤	3000	1600	4	3500	37630	CST		st2000	山矿	2001
官地矿	煤	900	1200	3.5	5600	37630	CST				2003
上榆泉矿	煤	2000	1400	4	2800	27560	CST				
平塑煤矿	煤	2500	1400	4	2200	27450	CST			上海青浦	

表1-2 国内圆管带式输送机的部分应用

主要参数	使用单位	投运时间
管径: 500mm 额定输送量: $Q=4500\text{t/h}$ 带速: $v=4.5\text{m/s}$ 角度: $0\sim10^\circ$ 输送物料: 铁矿石 水平机长: 990m	秦皇岛港矿石码头	2002年底
管径: 400mm 额定输送量: $Q=3500\text{t/h}$ 带速: $v=4.7\text{m/s}$ 角度: $0\sim11^\circ$ 输送物料: 铁矿石 水平机长: 2117m	秦皇岛港矿石码头	2004年8月
管径: 300mm 额定输送量: $Q=1000\text{t/h}$ 带速: $v=3.15\text{m/s}$ 角度: $0\sim6^\circ$ 输送物料: 铁矿石 水平机长: 2230m	上海梅山钢铁厂	2003年9月
管径: 300mm 额定输送量: $Q=1500\text{t/h}$ 带速: $v=3.15\text{m/s}$ 角度: $0\sim6^\circ$ 输送物料: 铁矿石 水平机长: 3600m	山东莱芜钢厂	2003年11月
管径: 250mm 额定输送量: $Q=140\text{t/h}$ 带速: $v=51\text{m/min}$ 输送物料: 硫铁矿和淤泥废渣 水平机长: 1906m	翁福肥厂	

1.2.3 辅助装置的发展

(1) 带式输送机平面转弯

带式输送机平面变向运行有2种方法,其一是采用特殊结构的输送带,如吊挂带式输送机,圆管带式输送机等;其二是让普通带式输送机实现自然变向运行,从而扩大普通带式输送机的应用范围。平面转弯运行是我国1959年首先在淮南矿区实现的,但是由于没有理论研究方面的依据,因此这项工作没能得到深入。1963年国外也实现了平面转弯运行,并相继进行了深入的理论研究,从而使这一技术在国外得到推广应用。目前澳大利亚在这方面的研究处于国际领先地位。我国对变向运行的推广比较缓慢,理论分析与设计计算方法尚需进一步深入研究,合理确定在不同情况下,支撑角、槽角、内曲线抬高角、转弯曲率半径及其阻力和带强等诸参数之间的相互关系,并要加强实验研究环节。

(2) 输送带

长距离、大运量带式输送机长度在1 km以内的,一般可选织物芯带;1~2 km以内的可选用织物芯带或者钢绳芯带;大于2 km一般选用钢绳芯带。目前,国内已可以生产st5400和st6300的输送带。各国对输送带安全系数的取值各不相同,最小的取 $n=4$ 。一般认为,即使采用可控软起动驱动装置,输送带的安全系数目前仍不宜小于7。由于国内对软起动驱动装置的使用还刚刚开始,有待于提高认识和积累实践经验。输送带的接头是其薄弱环节(接头强度一般为本体的80%~90%),对接头强度和可靠性仍然没有十分的把握,应进一步研究开发监视接头状态的在线检测。同时要采用新材料、新工艺,不断增强接头强度。纵向撕裂是长距离、大运量带式输送机容易发生的严重事故,一般应选用防撕裂输送带。防撕裂输送带是在垂直于纵向钢丝绳的方向,在一面或两面均匀铺设钢丝绳、钢丝帘线、纤维织物等增强层,使其抗冲击性好,耐撕裂性强。

(3) 存仓、料斗

带式输送机辅助装置的研究应该引起重视,生产中由于存仓、料斗的形状尺寸等设计不尽合理,材质的选用不当(特别是衬板),会产生堵塞、起拱、加料不均和偏载等现象,从而影响了整个系统的正常运转。法国、英国和澳大利亚等国家在理论研究和实验研究方面都处于世界领先水平。

(4) 输送带及其接头的监控

立足于投资少而又能解决现场实际问题,进一步开发完善对输送带的在线检测装置,检测钢绳芯输送带的断绳和接头,预报可能发生的损坏,并深入研究输送带防纵向撕裂的措施。提高带式输送机输送带接头强度,也是带式输送机的重要研究课题。

今后的趋势,我国圆管带式输送机除了发展大规格、大运量、长距离和大倾角外,还要充分利用其空间弯曲、布置灵活及密闭输送的特点,扩大其应用范围。同时要注意对圆管带式输送机的运行阻力,弯曲半径及输送带成形力等方面的理论研究;对输送带的结构形式、纵向和横向刚度(特别是横向刚度)进行试验研究,以便提高输送带的使用寿命和运行的平稳及可靠性。

长距离、大运量带式输送机需要深入研究的问题还有很多。随着国民经济的发展,对长距离、大运量带式输送机的需求不断增加,也将会促进我国长距离、大运量带式输送机的设计和制造水平不断提高。

1.3 设计方法的发展

近十几年来,国外对带式输送机相关理论的研究取得了很大进展,带式输送机主要部件的技术性能也明显提高,为带式输送机向长距离、大型化方向发展奠定了基础。随着对长距离带式输送机的可靠性和经济性要求的不断提高,其设计观点也在逐步发展。先进的设计观点,是以国际标准ISO 5048和德国工业标准DIN 22101为基础,设法减小运行阻力,合理确定输送带的安全系数,采用可控起、制动装置平稳起、制动,利用输送带粘弹性理论进行动态分析,对输送机进行工况预测和优化。

1.3.1 高性能部件的应用

带式输送机的主要阻力是由托辊旋转阻力和输送带前进阻力组成的。国外的试验研究表明,托辊旋转阻力和输送带压陷阻力占主要阻力的50%~85%,平均值为70%。因此,提高托辊精度和输送带性能,可以有效减小运行阻力。近10年来,托辊的结构形式推陈出新,特别是采用高性能的专用轴承和高精度的密封圈,有效地降低了托辊的旋转阻力。与此同时,输送带的面胶和芯胶材料也不断更新,使输送带既有一定的成槽性,也有一定的胶面硬度和耐磨性,有效地减小了输送带的压陷阻力,按照现行标准,主要阻力采用模拟摩擦系数 f 值进行估算。DIN标准和ISO标准建议,在通常工况下,取 $f=0.017\sim 0.020$;按国内设计经验,通常取 $f=0.020\sim 0.025$ 。研究表明,按现行标准推荐的模拟摩擦系数 f 值计算的主要阻力,在多数情况下偏大,较大程度地影响了输送机的经济性。修订的DIN 22101—1998(草案)提出了比较精确的主要阻力计算方法。即

$$F_{H_0} = (F_{R_0} + F_{E_0}) / q_0$$

式中 F_{H_0} ——上分支主要阻力;

F_{R_0} ——上分支托辊的旋转阻力;

F_{E_0} ——上分支输送带的压陷阻力;

q_0 ——系数,取 $0.5 \leq q_0 \leq 0.85$,平均值为 $q_0=0.7$ 。

$$F_{H_u} = (F_{R_u} + F_{E_u}) / q_u$$

式中 F_{H_u} ——上分支主要阻力;

F_{R_u} ——上分支托辊的旋转阻力;

F_{E_u} ——上分支输送带的压陷阻力;

q_u ——系数,取 $0.5 \leq q_u \leq 0.85$,平均值为 $q_u=0.7$ 。

新标准中主要阻力的计算,是以上下分支托辊的旋转阻力和输送带的压陷阻力为基础的。对于长距离带式输送机,主要阻力对整机影响很大,应预先测定所用托辊的旋转阻力和输送带的压陷阻力,才能比较准确地计算输送机的主要阻力。在托辊旋转阻力和输送带压陷阻力未知的情况下,新标准给出了模拟摩擦系数 f 的参考值。通常工况下, $f=0.010\sim 0.020$;恶劣工况下, $f=0.020\sim 0.040$ 。需要说明的是,标准中推荐的 f 值适用于上托辊间距 $1.0\sim 1.5$ m,下托辊间距 $2.5\sim 3.5$ m的情况。减小托辊间距, f 值可以减小,但阻力总值通常会增大,一般是不可取的。对于长距离带式输送机,国外通常采取增大托辊间距的方法降低阻力总值。上分支托辊间距可增大为 $2.5\sim 5.0$ m,下分支托辊间距可增大为 $5\sim 10$ m。

但是,这种设计要有充分的动态分析作为基础,以确保输送机运行可靠。

1.3.2 输送带安全系数的合理确定

输送带的安全系数,对带式输送机的经济性和可靠性影响很大,也是众多学者研究的重点。现行标准以输送带的额定破断强度为基础,综合考虑疲劳强度的大幅降低、由弯曲和伸长导致的强度下降、接头强度损失、起制动工况下动态张力的增加等因素,给出输送带的安全系数。例如,DIN 22101-1982标准建议,钢绳芯输送带的动态安全系数为4.8~6.0,稳态安全系数为6.7~9.5。其实,这种以输送带额定破断强度为基础的安全系数表示法并不十分直观。实际工程要求输送带的疲劳强度,在满足工况最大张力的基础上,具有适当的安全系数。20年前有研究认为,钢绳芯输送带在脉动循环10000次以后的疲劳强度,是其额定破断强度的36%,在此基础上,标准给出了上述安全系数值。

近十几年来,国外对输送带疲劳强度的试验研究表明,通过改进钢绳芯输送带的制造工艺和接头工艺,对于St 6000以下的钢绳芯输送带,其疲劳强度提高45%~55%。这样,可使DIN标准中推荐的动态安全系数减小到3.8~4.8,稳态安全系数减小到5.4~7.6。DIN 22101-1998(草案)标准,引入了输送带疲劳强度的概念,在此基础上,提出了与接头有关的输送带安全系数 S_0 和与寿命及工况有关的输送带安全系数 S_1 。

输送带疲劳强度安全系数: $S = S_0 S_1$, 则

$$K_{N,\min} = K_t / K_{t,rel} = K_{L,\max} S / K_{t,rel}$$

式中 $K_{N,\min}$ —— 输送带最小额定破断强度;

K_t —— 具有安全系数的输送带疲劳强度;

$K_{t,rel}$ —— 输送带疲劳强度与额定破断强度的比值,一般取0.45~0.55;

$K_{L,\max}$ —— 槽形输送带最大边缘张力。

最小、最大安全系数分别为: $S_{\min} = (S_0 S_1)_{\min} = 1.0 \times 1.5 = 1.5$, $S_{\max} = (S_0 S_1)_{\max} = 1.2 \times 1.9 = 2.28$ 。当 $K_{t,rel} = 0.45$ 时, $K_{N,\min} = K_{L,\max} \times (3.33 \sim 0.51)$, 当 $K_{t,rel} = 0.55$ 时, $K_{N,\min} = K_{L,\max} \times (2.72 \sim 4.15)$ 。

输送带最大张力通常发生在起制动工况下,采用软起制动装置,可以有效缓解动态张力的作用动态张力。可以通过动态分析比较准确地计算,也可以用稳态最大张力乘以起动系数 K_a 来粗略估算。采用软起制动装置时,起动系数可取 $K_a = 1.1 \sim 1.3$ 。

1.3.3 动态过程控制技术

减小动力作用按现行标准,带式输送机的起制动加速度应为 $0.1 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 。实际工程表明,这个数值已不适应长距离、线路复杂的带式输送机。通过动态分析可知,长距离、线路复杂的带式输送机,最好采用具有可控起制动功能的驱动装置,控制输送机按理想的起、制动速度曲线起动和制动,以减小输送带及承载部件的动态载荷;对于普通长距离带式输送机,可以采用软起制动驱动装置。

(1) 理想的起动速度

理想的起动速度,应使带式输送机平稳起动,且在整个起动过程中加速度的最大值较小,没有加速度突变,以最大限度地减小起动惯性和起动冲击作用。实际工程常用的比较理想的可控起动速度有以下2种:

1) 澳大利亚专家Harrison提出的起动速度

$$v(t) = \frac{v}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{T} \right) \quad 0 \leq t \leq T$$

式中 t —— 设计带速;

T —— 起动时间。

起动开始加速度为0时, 速度平稳增加; 到 $T/2$ 时, 加速度达到最大值, 速度达到 $v/2$; 然后, 加速度逐渐对称地降低, 速度继续增加; 达到设计带速时, 加速度降到0, 完成起动过程。除起点和终点外, 加速度的一阶导数是连续的。

2) 美国专家Nordell提出的起动速度

$$v(t) = 2v \left(\frac{t}{T} \right)^2 \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$v(t) = v \left(-1 + \frac{4t}{T} - 2 \frac{t^2}{T^2} \right) \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T$$

起动开始时, 加速度为0, 速度平稳增加; 到 $T/2$ 时, 加速度线性增加到最大值, 其值比Harrison的加速度值大27%, 速度达到 $v/2$; 然后, 加速度逐渐对称地降低, 速度继续增加; 达到设计带速时, 加速度降到0, 完成起动过程。加速度的一阶导数在 $0, T/2, T$ 时刻是不连续的, 但加速度导数的峰值只是Harrison的81%。

上述2种起动控制方式, 都能获得理想的起动效果。由于输送机在起动之前, 输送带处于松弛状态, 为避免输送带的冲击, 将输送带拉紧后起动, 可进一步改善起动峰值张力作用。因此, 需要在起动开始阶段加入一个时间延迟段, 延迟段的速度一般取为设计带速的10%。起动时间 T 是非常重要的设计参数, 可根据设计经验, 通过控制最大起动加速度或平均加速度, 初步确定起动时间, 再根据动态分析结果进行优化。一般情况下, 特长距离带式输送机的起动加速度不大于 0.05 m/s^2 , 中长距离的起动加速度不大于 0.1 m/s^2 。

为避免输送机在起动过程中发生共振等动力学现象, 起动时间 T 应满足下列条件

$$T \geq 5L/V_w$$

式中 L —— 输送机总长;

V_w —— 输送带纵向应力波传递速度, m/s 。

即起动时间 大于下分支输送带纵向应力波由机头传到机尾所需时间的5倍。其中

$$V_w = \sqrt{EB/(q_b + q_{R_u})}$$

式中 E —— 输送带弹性模量;

B —— 带宽;

q_b —— 单位长度输送带质量;

q_{R_u} —— 下分支单位机长托辊旋转部分质量。

目前, 工程上应用较多、具有可控起制动功能的驱动装置主要有交流变频调速驱动装置和CST可控起制动驱动装置。交流电机变频调速, 具有调速范围宽、精度高等特点, 易于实现起制动速度曲线的自动跟踪, 能够提供理想的可控起制动性能。其起动系数可以控制在 $1.05 \sim 1.1$, 起动加速度可以控制在 $0 \sim 0.05 \text{ m/s}^2$, 适用于长距离、线路复杂的带式输送机, 可以控制输送机按设定的“S”形速度曲线起动和制动, 以满足整机动态稳定性及可靠性的要求。变频调速驱动装置还可以提供低速验带速度。

CST可控起制动装置是长距离、大运量、线路复杂的带式输送机的理想驱动装置, 具

有设定起制动速度曲线自动跟踪控制功能、过载保护功能、多机平衡功能和低速验带功能。起动系数可以控制在1.05~1.1, 起动加速度可以控制在 $0\sim 0.05\text{m/s}^2$, 控制精度为2%。CST可控起制动装置的不利之处在于增加了液压系统的维护工作; 对于倾斜带式输送机, 必须设置较大的低速轴制动器和逆止器。

鼠笼电机加调速型液力耦合器的软起动驱动装置耦合器的充油量是可调的。电机空载起动后, 耦合器通过稳定地增加充油量, 输出恒转矩加速特性, 使带式输送机在设定的起动力矩下平稳起动, 起动系数可达1.1~1.3。鼠笼电机加调速型液力耦合器的驱动方式, 是比较理想的软起动装置, 常用于开环控制, 等加速起制动, 多机驱动时易于调整功率平衡, 适于大中型和线路简单的长距离带式输送机。其缺点是体积大, 需附加油液冷却装置, 占地面积较大。

绕线电机转子回路串接电阻的软起动驱动装置的绕线式电动机通过转子回路串接电阻, 可以软化电机输出特性。在起动过程中, 通过切换电阻, 既可以保证设定的起动力矩, 又可以限制起动电流。绕线电机转子回路串接电阻的驱动方式, 通常采用开环控制, 通过“二进制”切换电阻的方法, 可在有限的电阻级数下, 获得较多的起动加速级, 使带式输送机等加速、较平稳起动。采用绕线电机转子回路串接电阻的驱动方式, 可以方便地分别设定带式输送机的空载、满载起动特性和满载制动特性, 获得比较理想的起制动效果。这种驱动方式, 适用于大型、多机驱动系统的带式输送机。但绕线电机及电阻难于进行防爆处理, 不适于煤矿井下使用。

(2) 利用动态分析方法对大型带式输送机进行优化设计

现行标准, 对带式输送机起动和制动过程中的动力计算, 是把输送带作为刚体, 采用刚体动力学方法进行的。近十几年的研究和工程实践表明, 刚体动力学分析的结果, 只能满足短距离、小运量带式输送机工程设计精度的要求。对于长距离、大运量、布置复杂的带式输送机, 其动力学特性更为复杂且重要, 采用刚体动力学方法进行分析, 其精度已不能满足实际工程的需要。因此, 对于大型带式输送机, 必须采用较为精确的动力学分析方法。目前, 国际上普遍采用输送带粘弹性动力学方法, 对大型带式输送机的动力状态进行分析。所谓带式输送机的动态分析, 是将输送带按粘弹性体的力学性质, 综合计入驱动装置的起制动特性、各运动体的质量分布、线路各区段的坡度变化、各种运动阻力、输送带的初始张力、输送带的挠度变化、拉紧装置的形式和位置及张紧力等因素的作用, 建立输送机动力学数学模型, 求得输送机在起动和制动过程中, 输送带上的不同点随时间的推移所发生的速度、加速度和张力的变化。预报按传统的静态设计方法设计的输送机可能出现的动态危险和不安全之处, 对该设计提出改进和调整措施, 确定优化的设计和控制参数。

利用动态分析, 可以找出大型带式输送机在起动和制动过程中可能出现的动态危险, 如输送带的动态峰值张力、可能出现的危险工况下输送带的低张力、拉紧重锤的位移超出设计行程等。对于这些危险情况, 应该采取技术改进措施, 进行调整, 如调整或改换驱动装置及其起制动特性、在适当的位置加装制动装置、改变拉紧装置的形式或位置等。通过这些改进措施, 使输送机得以优化。

第2章 输送机运行稳态特性参数

2.1 基本稳态特性参数

图 2-1 所示为带式输送机系统示意图, 主要由动力驱动系统、运载系统、拉紧装置、控制及监测等系统组成。输送机运行过程中对各系统都有特定的要求, 后续章节将逐一进行分析。

2.1.1 带宽及敷设倾角

带式输送机正常运行时的工作参数需满足如下基本要求。

(1) 带宽

为完成生产能力需求, 输送带宽度 B 应按下式计算

$$B \geq \sqrt{\frac{A}{K \cdot v \cdot \gamma \cdot C}} \quad (2-1)$$

式中 A —— 输送能力, t/h ;

v —— 输送带运行速度, m/s ;

K, γ, C —— 分别为货载断面系数, 货载散积容重及输送机倾角系数[1]。

一般输送带宽度 B 除满足生产能力外, 还应满足如下要求

对未经筛分的松散物料

$$B \geq 2a_{\max} + 200 \quad (2-2)$$

对已经筛分的松散物料

$$B \geq 3.3a_p + 200 \quad (2-3)$$

式中 $a_{\max}$ —— 物料最大块度的横向尺寸, mm ;

a_p —— 物料平均块度的横向尺寸, mm 。

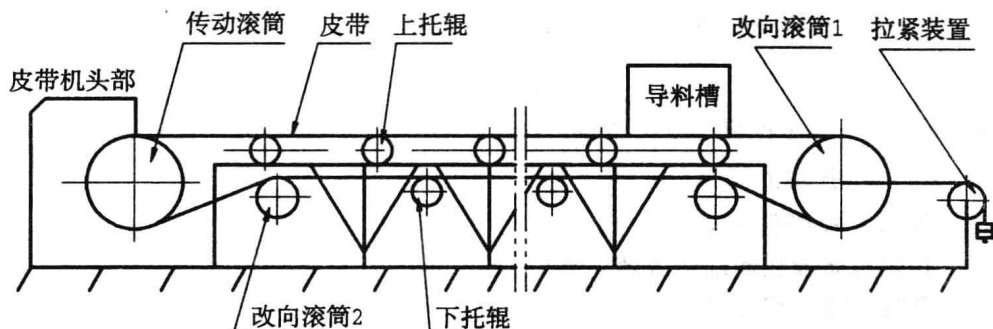


图 2-1 带式输送机系统示意图

(2) 最大敷设倾角

其它如运量、运距、输送高差及输送带敷设倾角与物料的堆积角密切相关,理论上只要输送带敷设倾角小于物料的动态堆积角即可正常输送物料,但输送带敷设的倾角将直接影响物料的输送强度,也直接影响输送带要求,见式(2-1)。

2.1.2 弯曲技术参数

(1) 凹曲垂直转弯曲率半径

1) 保证不发生飘带情况下的最小弯曲曲率半径。带式输送机垂直弯曲运行有凸曲和凹曲两种情况。在凹曲运行状态下,必须保证在输送机启动和制动等具有较大动张力状态下不发生飘带,才可保证在稳定运行状态下不发生飘带现象。如图 2-2 所示,取某一微段长输送带单元,该微段长输送带受如下几个力:

a) 微段长离心力 dQ : 由于 dQ 相对其它力很小,在计算中可不计其影响。

b) 微段长输送带及物料重力 dG :

$$dG = q_0 \cdot g \cdot \rho \cdot d\varphi \quad (2-4)$$

$$q_0 = q + q_b \quad (2-5)$$

式中 q —— 物料的线密度, kg/m;

q_b —— 输送带的线密度, kg/m;

g —— 重力加速度, m/s²;

ρ —— 输送带弯曲的曲率半径, m;

φ —— 微段输送带运行转角。

c) 微段长输送带及物料惯性力 dW_a :

$$dW_a = k_4 q_0 a \rho \cdot d\varphi \quad (2-6)$$

式中 a —— 启动或制动时带加速度, m/s²;

k_4 —— 运动部分总体变位重量换算系数。

$$k_4 = 1 + \frac{k_3 q_t}{q_0} \quad (2-7)$$

式中 q_t —— 托辊的等效线密度, kg/m;

k_3 —— 托辊变位重量换算系数。

$$q_t = q_t / s_t \quad (2-8)$$

式中 q_t —— 单个托辊的变位质量, kg;

s_t —— 托辊的间距, m。

d) 微段长输送带起点张力 S 。

e) 托辊对微段长输送带等效支承力 dN 。

f) 微段长输送带及物料惯性力 dW_a 。

g) 微段长输送带终点张力增量 dS 。

h) 微段长输送带运行阻力 dW , 可表示为