

刮板输送机动力学

行为分析与控制理论研究

毛 君 李贵轩 著

刮板输送机动力学

行为分析与控制理论研究

毛君 李贵轩 著

©毛 君 李贵轩 2006

图书在版编目 (CIP) 数据

刮板输送机动力学行为分析与控制理论研究/毛君, 李贵轩著. —沈阳:
辽宁大学出版社, 2006. 12

ISBN 7-5610-5197-2

I. 刮... II. ①毛... ②李... 'Ⅲ. ①刮板输送机—动力学—
研究②刮板输送机—控制论 IV. TH227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 090398 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 155mm×235mm

印 张: 11.25

字 数: 186 千字

出版时间: 2006 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2006 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 葵

封面设计: 邹本忠

版式设计: 程 莉

责任校对: 齐 月

定 价: 25.00 元

联系电话: 024-86864613

邮购热线: 024-86851850

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: Lnupress@vip.163.com

前 言

刮板输送机在散体物料输送中起着重要的作用，尤其是在煤矿工作面运输中已经成为不可替代的设备。近些年来，随着煤炭行业生产的高产、高效、集约化，煤矿综采工作面使用的刮板输送机向大功率、重型化和自动化方向发展。由于自身结构和环境因素的影响，刮板输送机的动力学特征明显且复杂，国内外专家、学者对此问题做过大量的研究工作。作者在认真学习、研究前人成果的基础上完成此书。

本书共分八章，研究的重点内容如下：

分析了刮板输送机链条纵向振动的特点并进行适当简化，推导出纵向振动的基本方程，考虑驱动性能差异确定了不同工况下的边值及初始条件。构造了振动方程的标准形式，得出了特定情况下的解析解。

研究了刮板输送机振动力学有限元模型的构造方法，分析了影响因素，在考虑链条的非线性特征、溜槽的弹性以及溜槽间隙、物料的物理特性、刮板的扭转、自动张紧系统作用等因素的情况下，构造了4种动力有限元模型并导出相应的振动微分方程；研究了刮板推移物料的力学问题；导出了保持物料稳定运行的刮板间距以及推力计算式；研究了在无载侧形成料栓时刮板的推力以及刮板输送机的运行阻力；以运行阻力最小为目标

优化刮板间距,结果与目前工程设计值基本一致;为便于建立仿真数据库,研究了常用驱动装置的特性,构造了动力学模型,建立了数学模型;分析了水平弯曲段处的受力和链条的张力差;推导出溜槽单元体摩擦阻力的计算式以及链轮与链条啮合角的计算式;在考虑链环间弹性接触问题的情况下,推导出链条的弹性伸长、刚度与拉力的关系,证明了其刚度具有非线性特征。

研究了动力仿真模型的构造方法,设计了一个能够描述输送机线路特征的形态函数,实现了动力仿真的自动建模;提出了对故障及异常载荷的模拟方法,开发了仿真软件,对刮板输送机的启动、制动、卡链、断链、链轮有限齿数波动链条产生的冲击(又称多边形效应)、链条节距误差等不同工况下进行了数值仿真,根据仿真结果分析了各种工况下不同因素对动载荷的影响。

研究了刮板输送机动态特性的控制理论及方法,对刮板输送机的启动、制动特性进行了研究,理论研究和仿真结果证明了控制启动速度可行,且按反“S”曲线启动最优;研究了以动载荷最小为目标函数的输送机主参数的匹配优化问题,运用振动与控制工程的理论推导出动态优化设计的目标函数和约束条件,并提出了便于工程应用的无共振设计方法;分析了刮板输送机链条预紧力对工作性能的影响,提出了刮板输送机链条预紧力的自动控制原理,设计了用电液比例阀或电液伺服阀控制的液压系统,研究其控制理论,推导出控制系统的传递函数,将模糊PID控制器引入到该系统的控制中,通过实例仿真证明了这种预紧力控制系统和控制方法具有很好的响应和稳定性。

实测了双速电动机直接启动的头尾双驱动输送机在启动、自动停机以及稳定运行时的链条动张力、链轮转速,并与理论分析结果比较,二者具有相同的规律,证明了理论研究的正确性。

本书在撰写过程中得到了辽宁工程技术大学师建国博士、魏晓华博士、曹艳丽博士的帮助，他们在本书的排版、绘图和公式的校对中做了大量的工作；张家口煤矿机械有限公司领导和专家们对本书的出版给予了大力支持；东北大学闻邦椿院士和辽宁工程技术大学李贵轩教授审阅了书稿，提出了宝贵的意见和建议，在此一并致以衷心的感谢。

作 者

2006 年 12 月于辽宁工程技术大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1. 1 刮板输送机的结构与工作原理	1
1. 2 现状及发展趋势	2
1. 3 我国工作面刮板输送机总体水平与国外的差距	4
1. 4 意义及国内外研究现状	6
1. 5 本书主要研究内容	9
第 2 章 刮板输送机静力学分析	10
2. 1 输送能力的计算	10
2. 2 运行阻力的计算	11
2. 3 阻力系数的分析	12
2. 4 货载分布的分析计算	13
2. 4. 1 刨煤机工作面输送机货载分布	13
2. 4. 2 滚筒式采煤机的工作面输送机货载量的计算	15
2. 5 弯曲产生的附加阻力计算	16
2. 6 本章小结	18
第 3 章 刮板输送机纵向振动的波动方程	19

3. 1 纵向振动的基本方程	19
3. 2 振动方程的边界及初值条件	22
3. 2. 1 单端驱动	22
3. 2. 2 双端驱动	24
3. 3 波动方程的解析解	28
3. 4 本章小结	31
第 4 章 刮板输送机动力分析的有限元法	32
4. 1 影响因素的分析	32
4. 2 动力有限元模型的构造	33
4. 2. 1 有限元模型的基本构造方法	33
4. 2. 2 整机动力学模型及动力方程	34
4. 3 驱动系统的动力模型	38
4. 3. 1 直流电动机驱动系统	38
4. 3. 2 异步电动机驱动系统	39
4. 3. 3 采用弹性联轴节的驱动系统	40
4. 3. 4 具有液力耦合器的驱动系统	41
4. 3. 5 具有滑差离合器的驱动系统	41
4. 3. 6 考虑齿轮啮合振动的动力问题	42
4. 4 有载侧链条移动的力学分析	44
4. 4. 1 刮板推动物料的受力分析	44
4. 4. 2 刮板推移物料时的运动分析	52
4. 4. 3 考虑物料粘、弹、塑性时刮板输送机有载侧的 动力模型	57
4. 5 运行阻力的分析计算	59
4. 5. 1 在非稳定工况下有载侧链条移动阻力	59

4. 5. 2	无载侧链条运行阻力	60
4. 5. 3	曲线段产生的附加阻力	62
4. 5. 4	溜槽的移动阻力	63
4. 6	曲线段处刮板转动分析	63
4. 7	圆环链刚度系数的计算	65
4. 8	本章小结	70
第 5 章	刮板输送机动力特性仿真	71
5. 1	仿真模型的构造	71
5. 2	动力仿真研究的内容	73
5. 3	刮板输送机启动时动力过程分析	74
5. 3. 1	启动工况下的动力分析	74
5. 3. 2	可控启动工况下的动力分析	78
5. 3. 3	制动后的再启动工况	80
5. 4	异常载荷工况下输送机的动力过程分析	85
5. 5	多边形效应对输送机振动的影响分析	94
5. 6	链轮半径、链条节距误差引起的载荷变化	98
5. 7	输送机断链时的动力特性分析	103
5. 8	本章小结	105
第 6 章	刮板输送机动态特性的控制理论	106
6. 1	动态特性控制原理	106
6. 2	启、制动特性的最优控制	107
6. 3	刮板输送机参数的优化配置研究	113
6. 4	刮板输送机张力调节系统研究	117
6. 4. 1	刮板输送机张力调节的目的	117
6. 4. 2	输送机预张力与最小张力	118

6. 4. 3 刮板输送机预张力自动调节原理·····	120
6. 4. 4 刮板链张力模糊 PID 控制器设计 ·····	127
6. 5 动态特性控制实例·····	132
6. 5. 1 刮板输送机的频率计算与无共振设计·····	132
6. 5. 2 启动过程优化结果对比与预张力控制实例分析·····	135
6. 6 本章小结·····	146
第 7 章 刮板输送机动态特性的实测·····	147
7. 1 实测条件及内容·····	147
7. 2 测试结果及分析·····	148
7. 3 本章小结·····	157
第 8 章 结论与展望·····	158
8. 1 结论·····	158
8. 2 展望·····	159
参考文献·····	160

第1章 绪论

1.1 刮板输送机的结构与工作原理

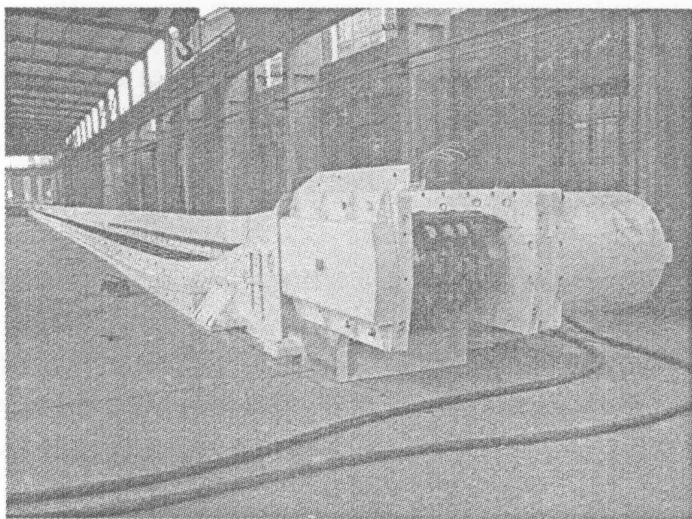


图 1-1 刮板输送机布置图

刮板输送机是以链条为牵引构件和溜槽为支承机构的连续运输机械，如图1-1所示。其组成部分：机头部（包括机头架、驱动装置、链轮组件等），机尾部（包括机尾架、驱动装置、链轮组件等），中间部（包括中部溜槽、过渡溜槽、开口溜槽、刮板组件），附属装置（紧链器、铲煤板、挡煤板、电缆槽、销

排等),机头架的作用除卸载外,还同机尾架一样对传动装置等起到支承作用。传动装置以前多为三相异步电动机、液力联轴器和减速器组成,目前大功率刮板输送机多采用双速电机、大功率行星减速器组合方式;工作时由传动装置驱动链轮转动,由链轮轮齿拨动闭环刮板链条运动,实现推移物料的目的;刮板链由刮板、圆环链和连接环等组成,其结构形式可分为单链、双边链和双中链几种形式。

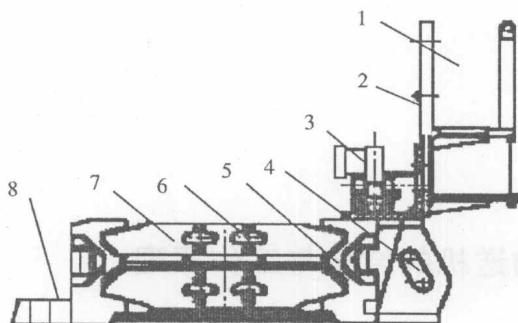


图 1-2 刮板输送机横断面图

1—电缆槽; 2—挡煤板; 3—导向装置; 4—千斤顶连接孔;
5—中部槽; 6—刮板链; 7—刮板; 8—铲煤板

1.2 现状及发展趋势

综采技术是集采煤、支护、运输及整体推进等作业为一体的机械化生产技术,国外通称为 Full Mechanization of Long wall Face。在近半个世纪的发展历程中,它已经成为当今世界最先进的井下开采技术。近几年在新技术推动下,正发生着变革性的进步,目前全自动化无人采煤工作面的综采技术是美、德等国科研工作的重要内容。综采设备是综采技术的核心部分,工作面刮板输送机是关键的综采设备之一。

采煤工作面刮板输送机是 1940 年由德国人发明的。20 世纪 50 年代中期,与工作面刮板输送机配套的液压支架在英国研制成功后,与滚筒采煤机一起,形成采、支、运三机配套的综采设备。由于工作面刮板输送机圆环链条和中部槽的可弯曲性,使输送机能适应底板起伏变化,可整体弯曲前移,因而成为不可替代的综采输送设备,并发展至今。

工作面刮板输送机自问世以来,经历了多种型式的发展和变化。其中

刮板链条型式经历了单中链式→边双链式→三链式→中双链式或单中链式(转载机为准双边链式)及“圆环链式→紧凑链式”的发展历程。自动调链装置是新型智能化输送机的又一个主要特征。该装置是1988年由德国DDM研究中心首先研制成功的,称为AVK刮板输送机自动紧链装置(Automatische Vorspannungsregelung für Rettenkrantzer Förderer)。之后美国JOY公司也研制出了ACTS装置(Automatic Chain Tensioning System)。两种装置原理相同,均是通过伸缩机尾达到自动调整链条松紧的目的。AVK装置和ACTS自动调链装置是在机头底链和机尾上链处,分别设一种传感器,可测量和识别链条松弛、过紧、正常三种状态,通过PLC可编程传感控制装置(Programmable sensor controller)的确认和分析,并与状态传感器(链速、油压、油缸位置)输入信号比较,作出判断后给电磁阀发出指令,控制机尾油缸的伸缩,达到自动调整链条松紧的目的,解决了大功率输送机链条调整困难的问题,避免了由于机头悬链和机尾堆链及链条过紧而造成的事故,使链条张力处于合理状态;启动技术是大功率刮板输送机制造的关键,目前我国常用的驱动装置采用单速电机与限矩型液力耦合器配合驱动及双速电机驱动两种类型;对刮板输送工况监测是高效综采设备安全生产的技术保障,目前国外已经将此技术应用于生产实际。

新型智能化刮板输送机代表了当今世界工作面刮板输送机的最高水平,其主要特征归纳为:大型化、智能化、高可靠性及元部件标准化。1988年4月,在澳大利亚“二十一世纪高产采煤系统讨论会”上,提出了实现长壁综采工作面日产3~4万吨的目标,同时对工作面刮板输送机主要参数进行了探讨。现在世界先进水平工作面都达到或超过了上述目标。例如,2000年2月,我国神华集团大柳塔矿综采面采用JOY公司设备,最高日产达3.7万吨。近几年综采技术的发展速度超过了专家预料,将继续向着高产、高效、自动化的方向发展。工作面刮板输送机必然随着综采技术的发展而继续发展,其发展趋势是:

(1)向大型化方向发展。装机功率为 $2 \times 800 \text{ kW} \sim 4 \times 800 \text{ kW}$,输送能力为 $2500 \text{ t/h} \sim 4500 \text{ t/h}$,输送距离为 $300 \sim 350 \text{ m}$,链条规格为直径 $48 \sim 52 \text{ mm}$,溜槽内宽为 $1000 \sim 1500 \text{ mm}$ 。

(2)向高耐久性 & 可靠性方向发展。

(3)向智能化、自动化方向发展。采用CST可控驱动装置和ACTS自动调链装置及工况监测系统等。

(4)向标准化、规范化方向发展。输送机零部件普遍标准化、规范化,保

证设计、加工质量和水平。

(5)向高适应性方向发展。适应不同综采工艺的工作面刮板输送机将会继续发展,如综放工作面刮板输送机、刨煤机工作面用输送机。

1.3 我国工作面刮板输送机总体水平与国外的差距

我国第1套综采工作面刮板输送机于1974年在张家口煤机厂研制成功,拉开了我国自行研制综采工作面刮板输送机的序幕。此后,在自主研发的基础上对引进的设备进行消化吸收,研制出了整体铸焊式溜槽输送机SGZ880/800,使我国的工作面刮板输送机研制水平迈上了一个新的台阶。但与国外先进水平相比,我国的工作面刮板输送机制造水平尚存在一定的距离。

1. 性能和结构方面

(1)装机功率小,输送能力低,运输距离短。国产工作面刮板输送机最大装机功率为 $3\times 700\text{kW}$,输送能力为 2200t/h ,输送距离为 250m 。主要特征参数比国外先进水平的同类参数小 $1/3$ 左右。

(2)耐久性差,可靠性低。我国齿轮设备耐久性试验为 1200h ,可靠性较低,国外齿轮耐久性试验达 $1500\sim 2000\text{h}$ 以上,国外输送机事故率小于 3% 。表1-1和表1-2分别是国内外工作面刮板输送机的主要技术特征。

表 1-1 我国新型工作面刮板输送机技术特征

型号	输送能力 $/(t\times h^{-1})$	功率 $/\text{kW}$	长度 $/\text{m}$	链条 $d\times t$ $/(mm\times mm)$	中部槽 $L\times B\times H$ $/(mm\times mm\times mm)$
SGZ1200/1400	2000	2×700	305	38×137	$1500\times 1200\times 355$
SGZ1000/1050	2200	2×525	250	34×126	$1500\times 1000\times 320$
SGZ960/750	1800	2×375	250	34×126	$1500\times 960\times 320$

表 1-2 国外新型工作面刮板输送机技术特征

型号	输送能力 /($t \times h^{-1}$)	功率 /kW	长度 /m	链条 $d \times t$ /(mm $\times$ mm)	中部槽 $L \times B \times H$ /(mm $\times$ mm $\times$ mm)	特征
PF4(德国)	4500	3×750	350	42×146	$1750 \times 1332 \times 335$	CST 可控 驱动装置 ACTS 自动 调链装置
PF5(德国)	4500	3×855	450	48×146	$1750 \times 1342 \times 385$	
JOY(美国)	4500	3×1000	430	52×146	$2000 \times 1200 \times 410$	

2. 加工和材质方面

加工手段落后,20 世纪 80 年代后期,我国煤机行业进口了一些高精度、高效率的加工设备,使部分冷加工技术水平有所提高。原材料、基础元件品种少,质量差。

3. 自动化水平方面

与国外先进水平相比,我国的工作面刮板输送机制造水平在自动化、智能化方面存在着较大差距。目前工作面刮板输送机的装机功率已经达到 $4 \times 800 \text{ kW}$,

刮板输送机的启动问题、功率平衡问题、过载保护、工况监控和链条张力调节问题日益突出。为此,国外公司研制出了各种可控驱动装置和自动调链装置。

4. 设计和试验方面

(1)设计手段落后,不能适应现代设计需要。我国有关单位目前仅采用 CAD 或 AutoCAD 绘图。

国外普遍采用现代化设计法,可实时进行三维动态仿真和有限元受力分析等,满足设计需要。

(2)标准化、规范化水平低,基础性工作差。

(3)我国刮板输送机试验和检测设备,能力不足,试验和检测技术手段落后。

5. 科学研究方面

我国在刮板输送机基础研究、实验手段、配套设备联动控制的技术研究

方面投入不足,尚没有完善的成套实验台及检测分析系统。

1.4 意义及国内外研究现状

由于刮板输送机的结构和工作环境决定了刮板输送机具有突出的动态特性:无论是与滚筒采煤机还是与刨煤机配套的刮板输送机其输送的货载量是在很大范围内变化的,有时是空载状态,有时是满载甚至是超载状态下运行;实际工作中刮板输送机上的货载与刮板运行速度不一致,导致刮板穿越物料运行,使刮板和运输的物料处在非稳定不同步的状态,这就进一步增加了运行阻力;刮板输送机常常是在满载状态下启动或停机(制动)或制动后再启动,这种工况会产生非常大的冲击;刮板链条的移动是靠驱动链轮有限齿数与链环啮合传动动力实现的,这种驱动过程不可避免地会产生冲击,而冲击扰动又会影响整个输送机的运行;当煤壁出现片帮或具有大块物料时会使得刮板输送机上的载荷突变甚至发生卡链现象,这种现象会在整个系统中产生冲击,严重时链条断裂;目前重型刮板输送机都采用头尾双驱动方式,一些因素会导致双驱动系统功率严重失衡;刮板输送机链条的力学性质是非线性,中部槽具有弹性或间隙以及转角等。上述诸多因素都在不同程度地影响刮板输送机的动力特性,可以说,刮板输送机具有时变的、耦合的非线性动力特征,准确地预测刮板输送机在各种工况下的动态特性是设计大功率刮板输送机的理论基础,又能为监测系统提供技术要求和技术支持,这项研究既具有理论意义,又具有应用价值。国内外一些学者对这个问题已经进行了一些研究工作,并取得了重要的研究成果。例如,前苏联莫斯科矿业学院对刮板输送机在运行中的振动问题用波动理论进行了研究,提出了在教科书中应用的理论成果;俄罗斯人 Макаров. М. И 博士对矿用刮板输送机驱动装置的振动特性进行了研究,证明了刮板输送机的振动具有非线性特征,提出了降低振动危险的方法和提高驱动装置可靠性的建议;英国人 J. A. N 库里用线弹性有限元模型对刮板输送机的动态特性进行了数字仿真,但建立的模型最高能分析 8 个节点;波兰人林玛罗安·高雷普斯基对刮板输送机链条断裂时系统的动态特性进行了研究,并对卡链过程也进行了分析,证明了卡链位置对冲击的影响;Dieter Lohning 等人对刮板输送机运行阻力进行了深入研究并进行了实测,为工程设计提供了重要的技术数据;Gtroid Kroger 和 Peter Brychta 研究了刨煤机工作面用刮板输送机工况监控问题,并对系统进行了动态测试;Marian Dolipski 和 Eryk Remiorz

对刮板输送机的链条自动张紧系统进行了研究,构造了力学和数学模型,并研究了油缸伸缩速度对系统稳定性的影响;波兰人 Dolipski. M 对带有液力联轴器的刮板输送机的启动特性进行过试验研究,实验中测试了传动装置的动载荷以及电动机电源电压降,证明液力联轴器优于弹性联轴器;Sikora. W 对高效刮板输送机传动装置负荷不均匀性进行了研究,提出了对驱动装置进行功率平衡的必要性;Dolipski. M 还对刮板输送机链条张力及应力进行了分析和解释,认为驱动装置启动的平稳性是影响链条张力的关键,并于 1993 年提出对刮板输送机进行动力学负荷验算的方法;俄国人 КаТрлч. А. Н 对工作刮板输送机链条张力与横向推移过程联系进行了研究,认为支架横向推移对链条张力有很大影响;Dolipski. M 还对刮板输送机溜槽间的亚铃型链接销进行了传动载荷研究;捷克、印度等国家的一些学者也对刮板输送机的动力学问题进行过研究,其结论和研究方法与德国人基本一致。我国从事这方面研究的有:王堃用波动理论对 SGW—250 及 SGW—150 刮板输送机进行了研究,导出了共振速度及共振长度的计算式;中国矿业大学朱平等人对刮板输送机减速器的动态特性进行了研究;张忠国对双速电机驱动刮板输送机的驱动系统性能进行了研究,提出了改善驱动性能的三种方案;王腾于 1998 年对刮板输送机负荷分配问题进行了深入的分析,对链条节距、电动机特性对功率分配的影响进行了研究;管荣根曾对刮板输送机的物料运移条件及参数进行优化;山西矿业学院王坤对圆环链刚度进行过研究;方佳雨教授对软启动技术在刮板输送机上的应用进行过研究,认为具有降低链条动张力,缩短启动时间,减小城市电网冲击等一系列优点;樊运平对影响圆环链与链轮啮合传动效率的因素进行过分析,提出了影响传动效率的主要原因;西安科技学院程安宁教授对圆环链接触应力进行过分析计算;张家口煤机厂王跃清、田莹对圆环链经过驱动链轮时的力学特性进行了分析,建立了力学模型和计算方法;煤炭科学研究总院太原分院苏卓明对圆环链与链轮啮合特性进行了实验分析研究,得出了一些有实用价值的结论;武汉食品工业学院平海用波动理论对刮板输送机振动载荷进行了研究,提出了用缓冲和润滑的办法可有效降低张力;中国矿业大学钱济国用模态分析技术对刮板输送机减速器的动态特性进行过研究,提出了分析的技术手段和方法;太原理工大学杨秀芳硕士用波动理论研究了刮板输送机的动态特性;张家口煤机厂总工程师付晨对刮板输送机的设计理论与实践进行过深入的研究,他对刮板输送机与支架配套及推移过程的力学问题进行研究时将三弯矩方程用于研究推溜力的计算,同时还详细地研