

苏荣华 彭晨宇 著

# 振动筛结构 随机动力学分析

ZHEN DONG SHAI JIE GOU  
SUIJI DONG LI XUE FEN XI



煤炭工业出版社

# 振动筛结构随机动力学分析

苏荣华 彭晨宇 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

振动筛结构随机动力学分析 / 苏荣华, 彭晨宇著. -- 北京:  
煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4045 - 1

I. ①振… II. ①苏… ②彭… III. ①振动筛-结构-随机  
分析-动力学分析 IV. ①TD452

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 084002 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)  
煤炭工业出版社印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

开本 880mm × 1230mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 10<sup>1</sup>/<sub>8</sub>  
字数 262 千字 印数 1—1 000  
2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷  
社内编号 6825 定价 28.00 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

## 内 容 提 要

振动筛是工矿企业中常见的筛分机械，是现代选煤厂重要的选煤设备之一，担负着物料脱水、脱介和分级等重要任务。振动筛在制造、安装、运行等环节中不可避免地存在着大量随机因素，采用随机动力学模型能揭示工程实际中的随机因素对振动筛结构动力学特性及动力学响应的影响规律。本书系统地论述了振动筛结构随机动力学分析方法及研究成果，主要包括振动筛国内外研究现状，振动筛结构及工作原理，确定性模型下振动筛动力学分析，振动筛随机动力学模型建立，振动筛模态频率变异性分析，振动筛动态响应变异性分析以及研究成果在某具体型号振动筛上的应用。

本书可供从事振动筛结构设计及随机动力学理论等方面研究的科研人员以及相关专业的本科生、研究生、教师阅读，也可供相关领域的研究人员参考。

## 前 言

煤炭是我国主要能源，煤炭产量和消费量分别占全国一次能源生产和消费总量的76%和69%，我国已成为世界上最大的煤炭生产国和消费国。随着煤炭需求量及产量的增加，煤炭消费对我国的环境影响不容忽视，为此国家提出要大力推动清洁煤技术，增加原煤洗选率，从而提高煤炭质量，减少燃煤污染物排放，提升煤炭利用效率，节约能源。同时原煤洗选去除大量杂质还可以优化产品结构，提高产品竞争能力，减少运力浪费。

振动筛以结构简单、处理能力大等优点广泛应用于各类原煤洗选工艺中，是重要的选煤设备之一，担负着煤泥脱水、脱介和分级等重要任务。近些年来，为了适应煤炭产量大幅增加的要求，振动筛工作效率不断提高，振动筛结构向着大处理量、高效率和大型化的方向发展。但在现场使用过程中，由于振动筛工作环境恶劣，工作时间长，在较高振动频率下，不仅承受被筛分物料的重力和冲击力，还要承受较大的交变激振力，且受客观因素影响、现场维护不及时等因素影响，振动筛频繁出现筛箱振动超限，侧板、横梁、筛板断裂等问题，给企业生产造成巨大经济损失。

鉴于振动筛设备安全运行的重要性，国内外对振动筛结构进行了大量静、动力学研究。目前，对于振动筛动力学分析多数是基于确定性模型。此类模型中，所有动力学分析中相关参数均视为确定性的量，忽略了振动筛在制造、安装、运行等过程中的结构参数随机性及激励随机性。设计中满足静、动力强度要求的振动筛，在使用过程中出现的结构破坏问题，难以用确定性模型的静、动力分析进行合理解释。

对于振动筛实际结构，结构参数和激励的随机性不可避免地



对结构响应产生影响，因此振动筛动力学分析中必须考虑随机性。通常，结构随机性研究采用实测数据进行分析，然后总结出经验系数或曲线，以指导结构设计。该方法由于需要样机进行测试分析，根据分析结果再对结构进行改进，从而造成最终产品定型周期长，在设计阶段很难找到有效的方法指导，存在一定的盲目性。因而，采用随机动力学模型更能有效揭示实际结构存在的随机因素对振动筛动力学特性及响应产生的影响，而现有针对振动筛随机动力学分析的研究尚未见报道。

本书将随机动力学理论与有限元方法相结合，建立振动筛随机动力学分析模型，考虑振动筛结构中的激励随机参数和结构随机参数，对振动筛结构动力学特性及动力学响应变异结果进行了分析，并通过动力学响应变异的变化率分析，研究响应变异性对参数变异系数的灵敏程度，确定随机参数中的灵敏随机参数和非灵敏随机参数，深入揭示了参数随机性对振动筛结构动力学特性及动力响应的影响规律。

同时，本书针对某型振动筛进行了具体分析，研究成果为振动筛可靠性设计提供了理论支撑，对提高振动筛设计可靠性，缩短产品开发周期，保证振动筛设备安全运行有着重要的理论意义和实用价值。

在本书编写所需有关资料收集及现场测试过程中，得到中煤科工集团唐山研究院技术人员的大力支持和热情帮助，对此深表感谢。本书的出版得到了国家“十一五”科技支撑计划课题项目（2006BAA01B05）的资助。

限于作者水平，书中的疏漏和不足之处在所难免，恳请广大专家、学者不吝批评指正。

著 者

2011年12月

# 目 次

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 振动筛动力学分析研究背景 .....	1
1.2 振动筛国内外研究现状 .....	3
1.3 随机动力学分析方法 .....	13
<b>2 数学基础</b> .....	20
2.1 概率论基础 .....	20
2.2 随机过程 .....	26
<b>3 振动筛结构及工作原理</b> .....	31
3.1 概述 .....	31
3.2 振动筛主要结构 .....	33
3.3 振动筛工作原理 .....	37
3.4 振动筛工艺参数选择 .....	40
3.5 动力学参数计算 .....	42
<b>4 振动筛动力学分析</b> .....	47
4.1 振动筛结构力学模型 .....	47
4.2 振动筛有限元模型 .....	49
4.3 橡胶弹簧力学性能参数测定 .....	64
4.4 动力学特性分析 .....	105
4.5 动力学响应分析 .....	143
4.6 振动筛结构模态频率及振幅测试 .....	158
4.7 模型精度及效率分析 .....	164

<b>5</b>	<b>振动筛随机动力学模型建立</b> .....	168
5.1	振动筛随机结构系统振动方程 .....	168
5.2	基于摄动法求解 .....	169
5.3	基于 Monte Carlo 法求解 .....	173
5.4	振动筛随机动力学有限元模型 .....	175
<b>6</b>	<b>随机动力学模型下振动筛模态频率变异性分析</b> .....	178
6.1	模态频率变异性定量描述 .....	178
6.2	橡胶弹簧弹性模量随机时模态频率变异 规律 .....	179
6.3	橡胶弹簧密度随机时模态频率变异规律 .....	181
6.4	钢材弹性模量随机时模态频率变异规律 .....	183
6.5	钢材密度随机时模态频率变异规律 .....	184
6.6	多参数随机时模态频率变异规律 .....	186
6.7	模态频率变异变化率分析 .....	188
<b>7</b>	<b>结构参数随机时振动筛动态响应变异性</b> .....	204
7.1	动态响应变异性定量描述 .....	204
7.2	振幅变异性分析 .....	205
7.3	动应力变异性分析 .....	215
7.4	随机响应对结构参数变异变化率分析 .....	225
<b>8</b>	<b>激励随机时振动筛动态响应变异性</b> .....	251
8.1	振幅变异性分析 .....	251
8.2	动应力变异性分析 .....	256
8.3	随机响应对激励参数变异变化率分析 .....	261
<b>9</b>	<b>应用举例</b> .....	286
9.1	ZK 型直线振动筛概况 .....	286



---

9.2 参数随机性对振动筛模态的影响 .....	288
9.3 参数随机性对振动筛振幅的影响 .....	290
9.4 参数随机性对振动筛动应力的影响 .....	296
参考文献 .....	300

# 1 绪 论

## 1.1 振动筛动力学分析研究背景

煤炭是我国主要能源，煤炭远景储量已超过  $5 \times 10^{12}$  t，探明资源量  $1.2 \times 10^{12}$  t，探明可采储量仅次于俄罗斯和美国，居世界第3位<sup>[1]</sup>。目前我国年用煤量已经达到  $30 \times 10^8$  t，并且还将逐年增长，煤炭产量和消费量分别占全国一次能源生产和消费总量的76%和69%，我国已成为世界上最大的煤炭生产国和消费国。尽管随着我国能源结构的不断调整，可再生能源不断发展，但在未来相当长时间内，煤炭仍然是我国基础能源，到2015年，我国煤炭需求预测的推荐值为  $(39.18 \sim 40.16) \times 10^8$  t<sup>[2]</sup>。

近年来，随着我国煤炭需求量及产量的增加，我国开始逐渐重视大规模使用煤炭资源带来的严重环境问题，提出大力推广洁净煤技术的方针，来达到减少污染排放，提高煤炭利用效率的目的。对原煤进行机械洗选，可以降低原煤中的杂质，提高原煤质量，减少污染排放；同时对物料进行筛选和分级，可适应不同用户的需求，提高煤炭利用率。世界主要产煤国的原煤洗选率一般在70%~80%，有些发达国家能够达到100%，而我国原煤洗选率较低，大量的煤炭作为动力煤直接用于燃烧，热能转换率低，造成煤炭资源的严重浪费<sup>[3,4]</sup>。我国“十一五”期间，全国原煤入洗率由2005年的31.9%提高到2010年的50.9%，力争在“十二五”末期实现原煤洗选率达到70%的目标。

振动筛作为高度机械化、自动化的现代选煤厂重要选煤设备之一，担负着煤泥脱水、脱介和分级等重要任务。振动筛以其结构简单、处理能力大和工作可靠等优点在所有筛分设备中占到80%<sup>[5]</sup>。图1-1所示为某型号直线振动筛实体图。

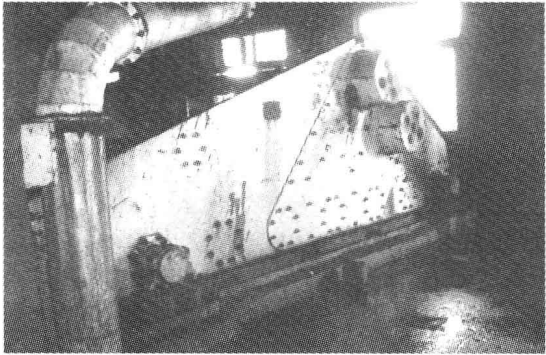


图 1-1 直线振动筛

随着煤炭产量需求增长,要求设备生产效率大大提高,振动筛向着大处理量、高效率 and 大型化的方向发展<sup>[5-7]</sup>,同时振动筛工作环境恶劣,工作时间长,在较高振动频率下,不仅承受被筛分物料的重力和冲击力,还要承受较大的交变激振力,且受客观因素影响,现场维护不及时,导致振动筛在现场使用过程中频繁出现筛箱振动超限,侧板、横梁、筛板断裂等问题<sup>[8-15]</sup>。

对于机械连续运转、流水作业的现代选煤厂,如果生产线上关键设备突然出现故障,导致选煤厂非计划性停产,将给企业造成重大经济损失。如马脊梁选煤厂<sup>[16]</sup>,所用筛分设备之一为 Honert 公司生产的 BRU-1-420/610 型香蕉振动筛,在 2004 年突然出现大梁断裂,振动筛无法正常运转,由于更换新的大梁需要从国外订货,订货周期长达半年之久,严重影响了选煤厂的正常生产,造成巨大经济损失;同时,由于马脊梁选煤厂是坑口型选煤厂,煤矿产出原煤只能进入选煤厂生产线,没有其他出口,选煤厂煤仓设计限制为煤矿 3 天的产量,若选煤厂因振动筛设备严重故障停产 3 天,将会导致整个煤矿停工停产,经济损失和社会影响巨大。

鉴于振动筛设备安全运行的重要性,国内外对振动筛结构进

行了大量静、动力学研究。但在现场使用过程中,振动筛结构破坏仍时有发生,不论是国产还是境外引进的大型振动筛,在其运转到一定时期后,筛箱侧板开裂、主梁断裂、轴承损坏等重大事故时有发生,尤其是国产振动筛,其无故障运行时间远低于国外同类产品,远远不能满足企业生产要求。

目前,对于振动筛动力学分析多数是基于确定性模型。此类模型中,所有动力学分析中相关参数均视为确定性的量,忽略了振动筛在制造、安装、运行等过程中,结构参数随机性<sup>[17-23]</sup>及激励随机性<sup>[24-29]</sup>。设计中满足静、动力强度要求的振动筛,在使用过程中出现的结构破坏问题,难以用确定性模型的静、动力分析进行合理的解释。

对于振动筛实际结构,结构参数和激励的随机性不可避免地结构响应产生影响,振动筛动力学分析中必须考虑随机性。一般结构随机性研究,通常采用实测数据进行分析,然后总结出经验系数或曲线,以指导结构设计。该方法由于需要生产产品样机进行测试分析,根据分析结果再对结构进行改进,从而造成最终产品定型周期长,在设计阶段很难找到有效方法指导,存在一定的盲目性。

## 1.2 振动筛国内外研究现状

### 1.2.1 国内外振动筛设备发展现状

国外从16世纪开始筛分机械的研究与生产<sup>[30]</sup>,在18世纪欧洲工业革命时期,筛分机械得到迅速发展,到21世纪,筛分机械发展到一个较高水平。德国申克公司可提供260多种筛分设备;STK公司生产的筛分设备系列品种全,技术水平高;KHD公司生产的200多种筛分设备通用化程度较高;海因勒曼公司和KUP公司都研制了双倾角的筛分设备。美国RNO公司采用了不同速度的激振器,研制了DF11型双频率筛;DRK公司成功研制了由一台高速电机驱动、三路分配器给料的筛机。日本东海株式会社和RXR公司等合作研制了垂直料流筛,把旋转运动和旋回

运动结合起来,对细料一次分级特别有效。英国研制的旋流概率筛成功解决了从湿原煤中筛出细粒末煤。苏联研制了一种多用途兼有共振筛和直线振动筛优点的自同步直线振动筛。

由于工业发展缓慢,基础比较薄弱,理论研究和技术水平相对落后,我国筛分机械的发展始于20世纪50年代,大体上可分为仿制、自行研制和引进提高3个阶段<sup>[31]</sup>。

(1) 仿制阶段。20世纪50年代,我国筛分设备相对落后,这期间以洛阳矿山机器厂、锦州矿山机械厂和上海冶金矿山机械厂为主的几个制造单位,主要仿制了苏联的ГΥΠ系列圆振动筛, BKT-11、BKT-OMZ型摇动筛;波兰的WK-15型圆振动筛、CJM-21型摇动筛和WP1、WP2型吊式直线振动筛。这些筛分机的仿制成功,初步奠定了我国筛分机械的基础,并培养了一批技术人员。

(2) 自行研制阶段。1966—1980年,洛阳矿山机械研究所、鞍山矿山机械厂、北京煤矿设计院、沈阳煤矿设计院、平顶山选煤设计研究院、西安煤矿设计院、东北大学等多个研究单位分别组成联合设计组,研制了一批性能优良的新型筛分设备,如1500 mm × 3000 mm重型振动筛及系列,15 m<sup>2</sup>、30 m<sup>2</sup>共振筛及系列,煤用单轴、双轴振动筛系列, YK和ZKB自同步直线振动筛系列,等厚筛、概率筛系列,冷热矿筛系列。这些设备虽然存在着故障较多、寿命较短的问题,但是它们的研制成功基本上满足了国内需要,标志着我国筛分机走上了独立发展的道路。

(3) 引进提高阶段。20世纪80年代,我国筛分机进入了一个新的发展阶段。我国在引进德国、乌克兰、日本等国家的先进筛型产品的同时,派遣专业技术人员去美国和德国进行技术考察,并进行技术引进,将国外先进筛型转化为国产系列,成功研制了振动概率筛系列、旋转概率筛系列,完成了箱式激振器等厚筛系列、自同步重型等厚筛系列、重型冷热矿筛系列、弛张筛、螺旋三段筛的研制,粉料直线振动筛、琴弦振动筛、旋流振动筛、立式圆筒筛的研制也取得成功。

国外著名振动筛公司生产的大型振动筛<sup>[32]</sup>见表 1-1。

表 1-1 国外公司生产的大型振动筛

公 司	宽/m	长/m	筛分面积/m <sup>2</sup>
德国筛子技术公司	5.5	10	50
德国申克公司	4	8.5	34
德国洪堡特和伟达克公司	4.5	6.5	30
日本神户制钢所	4.8	7.1	34.08
美国 RNO 公司	3.7	7.3	27
日本川崎重工	4	12	48

我国生产制造的部分大型振动筛<sup>[33]</sup>见表 1-2。

表 1-2 我国制造的大型振动筛

型 号	筛分面积/m <sup>2</sup>	处理能力/(t·h <sup>-1</sup> )
YAH2460 圆振动筛	14.4	1500
ZMD2556 圆振动筛	14	—
USL4.50×6.50 直线振动筛	27	1080
SLZ4090 冷矿筛	36	540
ZK30525	15.75	625

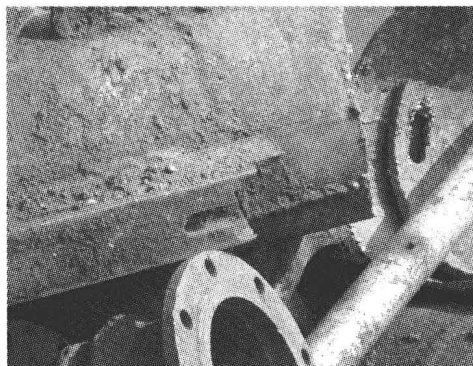
从现有文献资料及对现场使用调研信息反馈来看，不论是国产还是境外引进的大型振动筛，在其运转到一定时期后，筛箱侧板开裂、主梁断裂、轴承损坏等重大事故时有发生，严重影响选煤厂的正常生产。图 1-2 所示为某选煤厂振动筛横梁断裂实物图。

随着对振动筛的研究不断深入，国内外学者和技术人员对筛箱结构、结构强度、结构设计等方面进行了大量的研究工作，使振动筛结构设计得到迅速发展和完善。

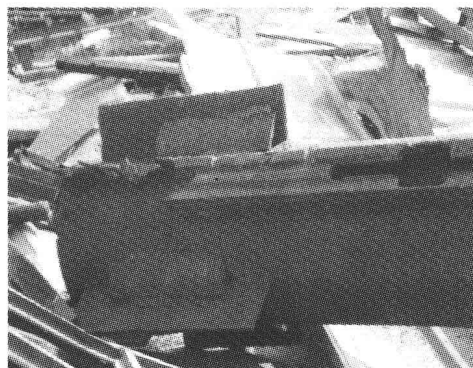




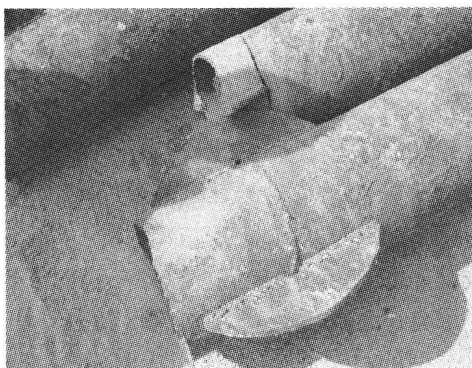
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-2 横梁断裂实物图

### 1.2.2 国内外振动筛相关理论研究现状

1965 年, E. V. Grigor'ev、M. Platonov<sup>[34]</sup> 等人对自平衡振动筛振动器故障原因进行分析, 提出一种新型的振动筛弹性联轴器, 提高了振动筛无故障运行时间。1969 年, V. M. Zinin、N. I. Noskov<sup>[35]</sup> 对 168-GR 型振动筛在使用过程中出现的问题进行了分析, 并提出了改进方案。

1975 年, 东北工学院韩二中教授<sup>[36]</sup> 使用古典结构力学方法, 对共振筛横梁结构简化, 进行了等效静强度分析, 计算横梁工作时内力分布, 确定最大受力位置。1979 年, 武汉钢铁学院黄培文<sup>[37]</sup> 分析了筛机弹性系统振动过程, 着重研究了稳定振动阶段运动微分方程式, 提出了用 4 个自由度代替当时 2 个自由度计算热筛的方法, 对 SZR3.1 × 7.5 烧结热矿振动筛进行了运动学参数计算, 并将计算结果与实测进行了比较。

1981 年苏联 B·H 巴杜拉耶夫等人<sup>[38]</sup> 用结构力学方法, 对冷矿筛的筛体进行了结构强度分析和研究, 该方法主要是将筛框简化为平面刚架结构, 计算了结构的主要内力-弯矩。分析结果表明: 筛框是振动筛最薄弱的环节, 而横梁自身强度不足, 截面

尺寸不对称以及力作用面与梁惯性面不重合,使梁产生弯曲与扭转,是引起梁产生开裂的主要原因之一。

1983年,韩二中、虞和济<sup>[39]</sup>对振动筛的框架强度进行了分析。应用有限元法,采用板元素,计算中将筛框的侧板及侧板之间联系梁视为薄壁杆件,将整个筛框看做一平面钢架结构,对全筛框作静强度分析。1985年,东北工学院纪盛青<sup>[40]</sup>对激振器偏移式自同步振动筛固有频率、振型及响应进行了分析,将振动筛简化为具有6个自由度的系统并建立振动微分方程,讨论了系统的固有频率、振型的计算和频率比。1987年,东北工学院郭星辉、韩二中<sup>[41]</sup>,针对振动筛筛框进行等效静强度分析,开发了有限元分析专用程序,程序计算结果与实测数据吻合较好。1989年,洛阳工学院姚家华、杨民献<sup>[42]</sup>,对ZKB3675直线振动筛的横梁进行了强度及动应力集中问题的讨论,分析了横梁断裂原因,提出了改进措施。

1990年,苏联学者O. V. Voinov等人<sup>[43,44]</sup>用有限元法对振动筛进行了强度计算,指出振动筛筛框侧板不仅在水平面内有弯曲变形,在垂直面内也会发生弯曲,同时指出用有限元法计算筛箱强度可以减少古典结构力学方法所作的过多假设和限制,更能反映实际情况,计算结果也更精确、更全面、更明了直观。

黑龙江矿业学院周广林<sup>[45]</sup>应用有限元理论计算了2ZSM2065A型振动筛固有特性及动态应力,并进行了测试分析。得到该筛机工作频率靠近第二阶固有频率,振动筛在近共振区工作,并提出了改进意见。1992年,张相春<sup>[46]</sup>通过对工字型截面及矩形截面横梁力学性能的对比及实例计算,证实了工字型截面梁是不合理截面梁,充分肯定了矩形截面梁的合理性。1993年,重庆大学龙建勋、薛红武、邵定山<sup>[47]</sup>对2ZK2460直线振动筛侧板和横梁按不同工况组合条件下,分别进行了有限元静动力计算分析,得到最大变形、反力值及其作用位置,侧板总体上存在凸扭变形状态。

1995年,Steyn Jacques<sup>[44]</sup>指出振动筛在整个服役期间经历