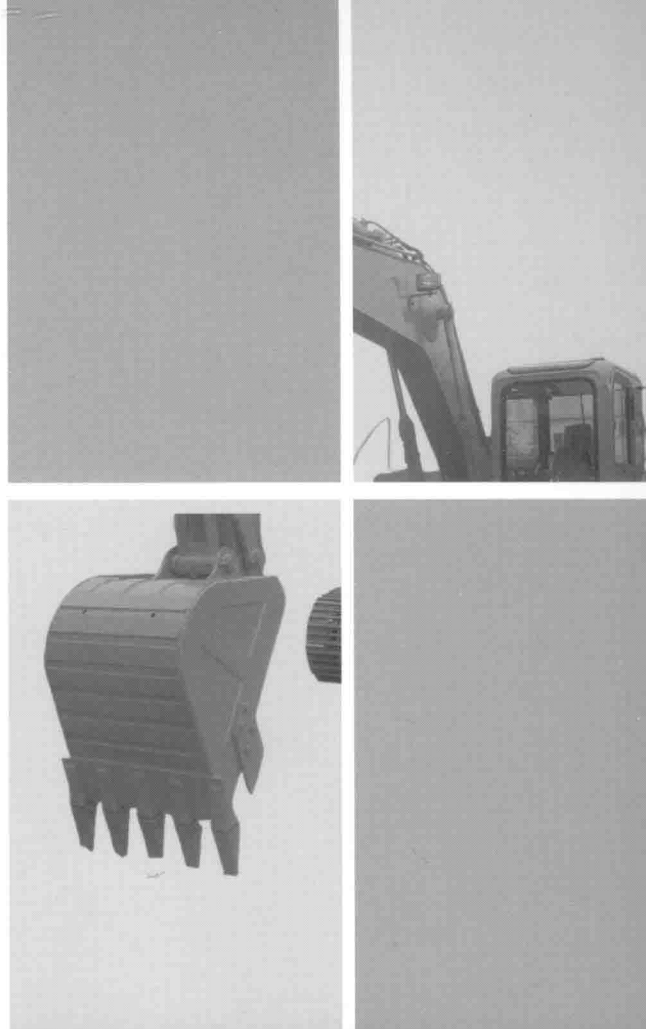


DANDOU YEYA WAJUEJI  
GONGZUO ZHUANGZHI GUANJIAN JISHU YANJIU



# 单斗液压挖掘机 工作装置关键技术研究

陈进 庞晓平 著



科学出版社

# 单斗液压挖掘机工作装置 关键技术研究

陈 进 庞晓平 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书全面系统地论述了液压挖掘机工作装置设计分析的关键技术,主要内容有工作装置的性能分析、优化设计、性能测试与分析、强度分析及结构优化设计,也涉及基于动态测试的疲劳寿命研究,同时采用了大量的案例分析来帮助读者更好地理解新方法,涵盖了常用的各种类型的工作装置,如反铲、正铲和伸缩臂式工作装置。作者根据多年从事液压挖掘机教学和与企业共同解决液压挖掘机工作装置实际问题的实践经验,总结并提出了一些新的设计方法、研究思路,与读者共享。

本书有较强的实用性和新颖性,主要适合于从事液压挖掘机设计、科研和制造的人员参阅,也可供有关院校师生实习时参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

单斗液压挖掘机工作装置关键技术研究 / 陈进, 庞晓平著. —北京: 科学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-03-040267-7

I. ①单… II. ①陈… ②庞… III. ①液压式挖掘机—研究  
IV. ①TU621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 053427 号

责任编辑: 杨 岭 孟 锐 / 责任校对: 钟 洋  
责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 20

字数: 470 000

定价: 87.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

液压挖掘机是一种多功能机械，目前被广泛应用于水利工程、交通运输、电力工程和矿山采掘等机械施工中，它在减轻人们繁重的体力劳动、保证工程质量、加快建设速度以及提高劳动生产率方面起着十分重要的作用。液压挖掘机具有多品种、多功能、高质量及高效率等特点，因此受到了广大施工作业单位的青睐，液压挖掘机的生产制造业也日益蓬勃发展。

由于国内挖掘机制造业起步晚、基础薄弱，目前国内挖掘机制造企业多采用类比法进行工作装置的设计，工程应用中常出现动臂或斗杆开裂失效、挖掘区域不合理或与机体干涉等故障，直接影响了国内挖掘机行业的发展，和其他工程机械产品相比，国产液压挖掘机缺少竞争力。从目前发展形势看，国产挖掘机品牌厂商正在以前所未有的速度进行扩张，在市场份额、产品性能、售后服务等方面不断提高。专家预测五年内国产挖掘机占比将达到 50%，说明了业内人士对于国产挖掘机的未来发展抱有很大的期望，同时也进一步反映了国内挖掘机生产制造企业对相关高新技术的强烈需求。

目前关于挖掘机的书很少，专门讲述挖掘机工作装置的书更是缺乏。本书所包含的研究方法，是由作者带领的研究团队结合企业的实际问题，经过多年来对单斗液压挖掘机工作装置关键技术的研究，运用优化设计方法、虚拟样机技术、仿真技术、性能测试理论等多学科综合方法，探索的一种全新、适应性强、可信度高的通用液压挖掘机工作装置设计方法。为挖掘机工作装置的设计提供理论依据和实用手段，对于提高国内液压挖掘机的设计水平，推动国内挖掘机行业的发展具有十分重要的意义。

本书可供具有一定工程机械基础知识的相关技术人员，在校本科生、研究生及研究相关领域的教师、研究员参考。由于时间和水平有限，书中难免有不足之处，希望读者批评指正，我们将不胜感激。

本书的出版要感谢参与液压挖掘机工作装置研究工作的研究生，他们是张石强、李维波、白玉琳、王芳层、杨莹、张正兵、李秋波、兰士新、李松林、张波、李刚、任志贵、王亚兵、贺康生、庆飞、黄定红、龚敏、顾兴通等。

作 者

2014 年 1 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 液压挖掘机简介	1
1.1.1 液压挖掘机的工作原理和基本组成	1
1.1.2 液压挖掘机的基本类型	3
1.1.3 液压挖掘机的特点	3
1.2 工作装置的研究意义及现状	5
1.2.1 研究意义	5
1.2.2 国内外研究现状	5
1.3 小结	7
第 2 章 液压挖掘机性能分析	8
2.1 反铲工作装置	8
2.1.1 机构特点及运动分析	9
2.1.2 位置模型	11
2.1.3 铲斗挖掘力学模型	13
2.1.4 考虑偏载和侧向力的铰点力的计算	20
2.1.5 反铲液压挖掘机性能分析软件	23
2.1.6 应用实例	33
2.2 正铲工作装置	42
2.2.1 机构特点及运动分析	43
2.2.2 挖掘力数学模型的建立	52
2.2.3 基于测试的挖掘阻力分析	58
2.2.4 挖掘性能分析	58
2.2.5 正铲液压挖掘机性能分析软件	71
2.2.6 应用实例	77
2.3 伸缩式挖掘装置	83
2.3.1 军事需求	83
2.3.2 运动学分析及挖掘力计算	86
2.3.3 设计合理性分析	98
2.4 小结	105
第 3 章 液压挖掘机工作装置优化	106
3.1 优化设计方法介绍	106
3.1.1 基本概念	106

3.1.2 遗传算法及其设计流程简介	107
3.2 反铲工作装置优化设计	109
3.2.1 设计变量	109
3.2.2 约束条件	111
3.2.3 目标函数	113
3.2.4 优化实例	113
3.2.5 反铲工作装置优化软件介绍	115
3.3 正铲工作装置优化设计	119
3.3.1 目标函数	119
3.3.2 设计变量	119
3.3.3 约束条件	120
3.3.4 优化实例	121
3.3.5 正铲工作装置优化软件介绍	122
3.4 伸缩式工作装置优化设计	124
3.4.1 目标函数	124
3.4.2 优化变量	125
3.4.3 约束条件	125
3.4.4 伸缩式工作装置优化软件介绍	134
3.4.5 实例分析	138
3.5 小结	141
<b>第4章 液压挖掘机性能测试与分析</b>	<b>142</b>
4.1 液压挖掘机工作装置运动学和动力学分析	142
4.2 基于测试的液压挖掘机挖掘阻力分析理论	148
4.2.1 挖掘阻力分析模型一	148
4.2.2 挖掘阻力分析模型二	152
4.3 液压挖掘机工作装置测试方案	153
4.3.1 测试目的	153
4.3.2 测试内容	154
4.3.3 测点及应变片布置设计	160
4.3.4 抗干扰措施	165
4.3.5 性能测试工况	165
4.3.6 测试注意事项	167
4.4 挖掘阻力测试分析	167
4.4.1 数学基础	168
4.4.2 数据处理工具	170
4.4.3 正铲液压挖掘机阻力测试分析——基于模型一	170

4.4.4 反铲液压挖掘机阻力测试分析——基于模型二	176
4.5 静态应力测试分析	189
4.5.1 有代表性测点的相当应力最大值	189
4.5.2 静强度安全系数评价	191
4.5.3 测试结论	192
4.6 动态应力测试分析	192
4.6.1 案例分析一——反铲液压挖掘机动态应力测试分析	192
4.6.2 案例分析二——正铲液压挖掘机动态应力测试分析	202
4.7 小结	204
<b>第 5 章 液压挖掘机工作装置强度分析及结构优化设计</b>	<b>205</b>
5.1 引言	205
5.2 液压挖掘机工作装置结构强度分析	206
5.2.1 常用的强度理论	206
5.2.2 液压挖掘机工作装置的有限元计算	208
5.2.3 直接编程分析工作装置的强度	217
5.2.4 实例分析	222
5.3 挖掘机工作装置结构优化	247
5.3.1 设计变量	247
5.3.2 目标函数	248
5.3.3 约束条件	249
5.3.4 优化实例	249
5.4 小结	251
<b>第 6 章 基于动态测试的正铲液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究</b>	<b>252</b>
6.1 研究背景	252
6.2 液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究状况	252
6.2.1 国外液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究状况	252
6.2.2 国内液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究状况	253
6.3 主要研究内容及技术路线	254
6.4 正铲液压挖掘机工作装置疲劳寿命预测基础理论	255
6.4.1 疲劳损伤的一些基本定义	256
6.4.2 正铲液压挖掘机工作装置疲劳类型	256
6.4.3 正铲液压挖掘机工作装置疲劳设计方法	258
6.4.4 正铲液压挖掘机工作装置疲劳预测方法	259
6.5 基于有限元法的正铲液压挖掘机工作装置疲劳分析方法	264
6.5.1 有限元软件的选取	265
6.5.2 挖掘机工作装置疲劳寿命分析的软件实现方法	266

6.6 正铲液压挖掘机工作装置有限元模型建立和疲劳载荷谱获取 .....	269
6.6.1 工作装置三维实体模型的建立 .....	270
6.6.2 工作装置有限元模型 .....	270
6.6.3 疲劳载荷谱的获取 .....	272
6.7 正铲液压挖掘机工作装置瞬态动力学分析 .....	278
6.7.1 MSC/NASTRAN 瞬态响应分析 .....	278
6.7.2 动臂瞬态响应分析 .....	283
6.7.3 斗杆瞬态响应分析 .....	289
6.7.4 与测试结果的对比 .....	293
6.8 正铲液压挖掘机工作装置疲劳寿命研究 .....	297
6.9 小结 .....	307
索引 .....	311



# 第1章 绪 论

## 1.1 液压挖掘机简介

液压挖掘机是在履带式、轮式或步履式下车装置上装有工作装置并能进行旋转的上车机构，由液压系统控制主机和工作装置，运用铲斗进行挖掘作业或物料搬运，在一个工作循环中不需要移动下车的自行式机械。它是在机械传动单斗挖掘机的基础上发展而来的，是目前挖掘机中重要的机种。

液压挖掘机与机械传动挖掘机一样，在工业与民用建筑、交通运输、水利施工、露天采矿及现代化军事工程中都有着广泛的应用，是各种土石方施工中不可缺少的一种重要机械设备。在建筑工程中，可用来挖掘基坑和排水沟、拆除旧有建筑物、平整场地等，更换工作装置后，可进行装卸、打桩和拔除树根等作业；在水利施工中，可用来开挖水库、运河、水电站堤坝的基坑、排水或灌溉的沟渠，疏浚和挖深原有河道等；在铁路、公路建设中，可用来挖掘土方、建筑路基、平整地面和开挖路旁排水沟等；在石油、电力、通信业的基础建设及市政建设中，可用来挖掘电缆沟和管道沟等；在露天采矿场上，可用来剥离表土、采掘矿石或煤，也可用来进行堆砌、装载和钻孔等作业；在军事工程中，可用来筑路、挖壕沟和掩体、建造各种军事建筑物。

液压挖掘机在构造和性能上有较多的优越性，因此近年来发展迅速，在中小型单斗挖掘机中，已取代了机械传动单斗挖掘机，成为工程机械的主要机种。

### 1.1.1 液压挖掘机的工作原理和基本组成

液压挖掘机的作业过程是用铲斗的切削刃(通常装有斗齿)切削土壤并将土装入斗内，斗装满后提升、回转至卸土位置进行卸土，卸空后铲斗再转回并下降到挖掘面进行下一次挖掘。当挖掘机挖完一段土后，机械移位，以便继续工作，因此，是一种周期作业的自行式土方机械。

液压挖掘机为了实现上述周期性作业的要求，设有下列基本组成部分：工作装置、回转机构、动力装置、传动操纵机构、行走装置和辅助设备等。常用的全回转式(转角大于 $360^\circ$ )挖掘机，其动力装置、传动操纵机构的主要部分、回转机构、辅助设备和驾驶室等都装在可回转的平台上，简称为上部转台。因而常把这类机械概括成由工作装置、上部转台和行走装置三大部分组成。挖掘机的基本性能也就取决于各组成部分的构造和性能。

液压挖掘机与机械挖掘机的主要区别在于传动装置的不同，以及由于传动的改变而引起的工作装置机构形式的不同。液压挖掘机的液压传动系统由液压泵、液压马达、液压缸、控制阀及油管等液压元件组成，并且采用液压分配器及各种控制阀来控制各机构

的运动。

图 1.1 为液压挖掘机基本组成及传动示意图。如图所示，发动机驱动两个液压泵，把高压油输送到两个分配阀，操纵分配阀，将高压油再送往有关液压执行元件(液压缸或液压马达)驱动相应的机构进行工作。

液压挖掘机的工作装置采用连杆机构原理，而各部分的运动则通过液压缸的伸缩来实现。图 1.1 为液压挖掘机最常用的工作装置——反铲装置。它由铲斗、斗杆、动臂、连杆以及相应的三组液压缸组成。动臂下铰点铰接在转台上，利用动臂液压缸的伸缩，使动臂(亦即整个工作装置)绕动臂下铰点转动，依靠斗杆液压缸使斗杆绕动臂的上铰点摆动，而铲斗铰于斗杆前端，并通过铲斗液压缸和连杆使铲斗绕斗杆前铰点转动。

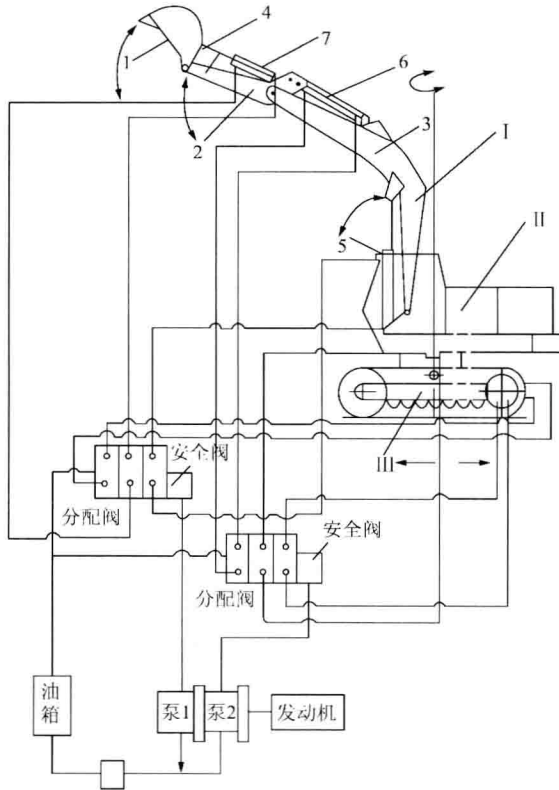


图 1.1 液压挖掘机基本组成及传动示意图

1-铲斗; 2-斗杆; 3-动臂; 4-连杆; 5、6、7-液压缸;

I-挖掘装置; II-回转装置; III-行走装置

挖掘作业时，接通回转机构液压马达，转动上部转台，使工作装置转到挖掘地点，同时操纵动臂液压缸，小腔进油液压缸回缩，使动臂下降至铲斗接触挖掘面，然后操纵斗杆液压缸和铲斗液压缸，液压缸大腔进油而伸长，使铲斗进行挖掘和装载工作。斗装满后，将斗杆液压缸和铲斗液压缸停动并操纵动臂液压缸大腔进油，使动臂升离挖掘面，随之接通回转马达，使斗转到卸载地点，再操纵斗杆和铲斗液压缸回缩，使铲斗反转进

行卸土。卸完后,将工作装置转至挖掘地点进行第二次循环挖掘工作。

实际挖掘工作中,由于土质情况、挖掘面作业条件以及挖掘机液压系统等不同,反铲装置的三种液压缸在挖掘循环中的动作配合可以是多种多样的,但也受到一定的限制(如能否复合动作等),上述仅为一般的工作过程。

总之,液压挖掘机采用三组液压缸使铲斗实现有限的平面运动,加上液压马达驱动回转运动,使铲斗运动扩大到有限的空间,再通过行走液压马达驱动行走(移位),使挖掘空间可沿水平方向得到间歇地扩大(即坐标中心可水平移位),从而可以满足挖掘作业的要求。由于挖掘作业要求的提高和多样化,工作装置的结构和驱动方式也在不断发展。

### 1.1.2 液压挖掘机的基本类型

液压挖掘机可按用途及其主要装置的特征进行分类。

按液压挖掘机主要用途及工作装置的不同分为通用型和专用型两种。中小型挖掘机大多数为通用型,即以挖掘土壤容重  $18000\text{N}/\text{m}^3$  为标准反铲斗的主要装置,并配有适于挖掘各种轻重土质和挖掘幅度的反铲、正铲、抓斗、装载、起重等多种可换装置。而大型液压挖掘机则以矿用正铲(同样以土壤容重  $18000\text{N}/\text{m}^3$  为标准型)为主要装置,一般亦配有挖掘轻重土、石料和各种挖掘幅度的正、反铲等装置,主要用于矿山采掘和转载,称采矿型或矿用型。

按工作装置的结构不同分为铰接式和伸缩臂式挖掘机,常用者均为铰接式,伸缩臂式挖掘机可用于平整清理场地和坡道等作业,故有挖掘平地机之称。

按行走装置的不同,液压挖掘机分为履带式、轮胎式、汽车式、悬挂式及拖式等。履带式因有良好的通过性能,应用最广,对松软地面或沼泽地带还可采用加宽、加长以及浮式履带来降低接地比压。轮胎式挖掘机行走速度快、机动性好,可在城市道路通行,故近年来在中小型液压挖掘机中发展较快。汽车式、悬挂式是以汽车及拖拉机为基础机械(底盘)装设挖掘或装载工作装置的小型挖掘机,适用于城建小量土方工程及农村建筑。拖式则没有行走驱动机构,转移由牵引车牵引,主要优点为结构简单、成本低。

按回转部分转角的不同,液压挖掘机有全回转和半回转两种。大部分液压挖掘机是全回转式的。

按主要机构是否全部采用液压传动又分为全液压式与半液压式两种,二者的区别在于半液压传动挖掘机的行走机构采用机械传动,少数挖掘机仅工作装置采用液压传动,如大型矿用挖掘机等。

### 1.1.3 液压挖掘机的特点

液压挖掘机由于采用了液压传动装置,在结构、技术性能和使用效果等方面具有很多特点,其优点综述如下。

(1) 技术性能提高,工作装置品种增多。液压挖掘机与同级机重的机械挖掘机相比,挖掘力提高一倍。液压挖掘机最大挖掘力可达机重的  $1/2$ ,甚至更大,而机械挖掘机的挖掘力只达机重的  $1/4$ 。因此在整机参数不变时,液压挖掘机可加大铲斗容量,提高生产率。液压挖掘机行走牵引力与机重之比大大高于机械挖掘机,行速、爬坡能力都大为

提高,还可装换加宽履带,使机械接地比压降低(可小于 10kPa)。当液压挖掘机陷入淤泥或土坑中时,可以利用工作装置进行自救或逾越沟渠等障碍物,液压挖掘机两条履带可独立驱动,实现就地转弯,使机动性和通过能力大为提高。工作装置采用液压传动使构造布置方便灵活,而且可按作业要求增加工作装置的种类,中小型挖掘机可带有几十种工作装置(最多达 150 种)以适应各种作业及工作尺寸的要求,从而扩大了机械的使用性能。

(2)简化结构、易损件减少、机重小。采用液压传动后可省去机械挖掘机复杂的中间传动零部件,简化了结构并减少了易损件,由于传动装置紧凑、重量减少,转台、底架等结构件的尺寸和重量都相应降低,故同级的挖掘机,液压传动式比机械传动式重量轻 30%~40%(如 WY100 型液压挖掘机机重 25t,而 W100 型机械挖掘机机重 43t)。

(3)传动性能改善,工作平稳、安全可靠。采用液压传动能实现无级调速且调速范围大(最高速与最低速之比可达 1000:1);能得到较低的稳定转速(柱塞式液压马达,稳定转速可低至 1r/min);液压元件的运动惯性较小并能实现高速反转(加速中等功率电动机需 1s 以上,而加速液压马达只需 0.1s),因此在换向频繁的情况下仍能动作平稳,冲击小,而液压油还能吸收部分冲击、振动。液压传动系统中设有各种安全溢流阀,在机械工作过载或误操作时不致发生事故或损坏机械。

(4)机构布置合理紧凑。液压传动采用油管连接,各机构部件间相互位置不受传动关系的影响与限制,布局较灵活,设计时易满足传动要求,结构受力均衡,维修方便,并且便于机械的改进、变型发展。

(5)操作简便、灵活。液压传动比机械传动操纵轻便灵活,尤其是采用液压伺服(先导阀)操纵,手柄操纵力小于 20N(不管主机多大),而机械挖掘机(如 W100 型)操纵力最大(80~200N);采用先导阀操纵杆数大为减少,主操纵手柄仅有两个,故司机操纵轻便,劳动强度大为减轻;驾驶室与机棚完全隔开,噪音小,视野良好,振动减轻,司机工作条件大为改善。

(6)易实现自动化,便于与电动、气动联合组成自动控制和遥控系统。

大型矿用液压挖掘机除上述优点外,还有以下优点:能进行分层开采,在掌子面有良好的清根能力,斗齿挖掘力增大 1~1.2 倍;可得合理的铲斗运动轨迹;提高采掘工艺性;减少卸载时漏料现象和动载荷;铲斗装满率提高 10%,循环时间缩短 15%;每方电耗量降低 30%,还可采用节能技术降低能耗;斗齿寿命提高 1.2 倍;机重可降低 45%~55%,投资和维修费用低(使用维修费可降低 25%~50%);可换装不同斗容、不同结构形式的铲斗,作业参数可按矿场工艺条件进行调整等。

液压挖掘机的主要缺点如下。

(1)液压元件加工精度要求高,装配要求严格,使用中液压系统出现故障时,现场进行排除较为困难,对维修条件和修理技术都要求较高。

(2)液压油的黏度受温度影响较大,总效率较低,同时液压系统容易漏油,渗入空气后产生噪声和振动,使运动不稳,并对液压元件产生腐蚀作用。

充分利用和发挥液压挖掘机的优点,改善和克服其缺点,使挖掘机在结构性能上得到不断提高和完善,是液压挖掘机发展中研究的基本问题。

## 1.2 工作装置的研究意义及现状

### 1.2.1 研究意义

液压挖掘机具有多品种、多功能及高效率等特点,在减轻人们繁重的体力劳动、保证工程质量、加快建设速度等方面起着十分重要的作用。液压挖掘机利用工作装置进行土石方的挖掘,工作装置的性能和可靠性是整机先进性的重要标志。工作装置的作业通过三组油缸的复合动作及铲斗和土壤的相互作用来实现,其运动和受力分析情况都比较复杂,这主要体现在:①作业对象多变,在多种土质条件与复杂的建筑施工现场使用,受力工况十分复杂;②工作过程中,每一个运动都是由两个或两个以上的部件参与工作;③在挖掘的过程中,工作装置受拉压、扭转与振动冲击等多种载荷的作用,且随着挖掘姿态的不同,挖掘力的大小与方向都在不断变化,因而实际的挖掘力是很难确定的。因此,开展液压挖掘机工作装置关键技术研究,寻求适合于通用液压挖掘机工作装置的设计理论和方法,对于提高工作装置的整体性能、整机作业效率及技术经济指标都具有重要的意义。

### 1.2.2 国内外研究现状

20世纪50年代第一台液压挖掘机问世,由于其具有挖掘能力强、生产率高、通用性好、操纵轻便等特点,在工程建设施工中起着重要作用。随着液压挖掘机产量的提高和使用范围的扩大,世界上著名的挖掘机生产商纷纷采用各种高新技术,提高产品的竞争力。在产品功能方面,液压挖掘机工作装置向多功能化的方向发展。当液压挖掘机配置不同的作业装置时,可以用来操作吊、夹、推、刮、松、挖、装、铣削、拆除、清除和压实等作业,且大都采用快换装置,驾驶员在驾驶室内就可以完成作业装置的更换,一般在2分钟内就可以完成。工作装置中动臂、斗杆结构变化多样,扩展了主机的使用功能。这一结构主要表现为动臂、斗杆长度的变化,由动臂、斗杆的二元件变化为两节动臂、斗杆的多元件和伸缩臂等。随着传统型和通用型产品样机减少,一些有特殊构造的、有特色的产品和多功能的产品备受用户的青睐,如挖掘机工作装置由大臂、中臂、斗杆和快换作业装置四元件构成的产品增多。这些多用途作业装置大大扩展了液压挖掘机的功用,提高了产品的施工适用性,同时也体现了市场差异化各厂家的产品发展战略和各自的技术水平。所以,研究专业性的挖掘机设计理论、方法,甚至是专用软件,以便缩短设计周期、提高产品性能和可靠性,快速响应市场和用户的需求,才能使挖掘机生产制造企业在竞争中立于不败之地。

#### 1. 国外研究现状

国外对液压挖掘机的研究主要体现在以下几个方面。

(1) 重视试验研究工作。液压挖掘机的研制除了保证机械技术性能外,还十分重视挖掘机的使用经济性和工作可靠性。所以,在研制过程中,进行各种性能试验和可靠性试验(包括构件强度试验、系统试验、操纵试验、耐久性试验等)是十分必要的。国外一般通过严格的科学试验和评价方法来确定是否进行定型生产。

(2) 重视电子计算机技术的应用。国外发展已经有总体、工作装置、液压系统等的设计程序,可以在短时间内进行总体设计,新产品从设计到批量生产的周期缩短到1~2年。

(3) 在技术方面,当前液压挖掘机的研制和改进主要着眼于发动机功率的充分利用和铲斗挖掘力的充分发挥。例如,通过各种途径使机械多做有效的功,其中包括动力装置与液压系统的最佳匹配、传动效率的提高、回转机构功率的回收、高效液压系统的研究等。

(4) 采用新结构和新材料,对工作装置、行走底架、回转平台优化结构,按应力分布不同合理应用不同的钢材,减轻整机重量,降低制造成本,提高使用可靠性和寿命。

## 2. 国内研究现状

我国从1967年开始自行研制液压挖掘机。早期开发成功的产品主要有上海建筑机械厂的WY100、贵阳矿山机器厂的W4-60、合肥矿山机器厂的WY601等。到20世纪70年代末80年代初,长江挖掘机厂和杭州重型机械厂分别研制成功了WY160和WY250等液压挖掘机产品。从1994年开始,美国的卡特彼勒公司、日本的神户制钢所、日本的小松制作所、日本的日立建机株式会社、韩国大宇重工、韩国现代重工业以及德国利勃海尔、德国雪孚、德国阿特拉斯、瑞典沃尔沃等公司先后在中国建立了中外合资、外商独资挖掘机生产企业,生产具有世界先进水平的多种型号和规格的液压挖掘机产品。

我国是一个地广人多的发展中国家,国家正不断加大对基础设施建设的投入。今后相当长的时间内,公路、铁路、港口、机场、能源、水利、农田、矿山、生态环境及城镇住宅建设等方面的大量的经济建设任务和国防建设均需大量的液压挖掘机,并且在众多施工场合,多种工作装置的液压挖掘机正在逐步替代装载机、推土机作业,因此挖掘机的需求量将有很大增加。将来的发展趋势是,不断推出可靠性好、售价低、维修性好、美观舒适的新机型,以新的营销观念、服务观念,与合资、独资企业产品争夺市场份额,开发适合各种自然条件下的经济型机、轮胎式机、多种用途机等新产品,以满足多方位、多层次的需求。

工作装置机构合理与否关系到挖掘机整机工作性能和各个部件的使用寿命,所以挖掘机工作装置机构设计的最优化问题一直是业界十分重视的关键问题。尽管关于挖掘机工作装置机构特性的研究已经有很多,但是受软件条件、硬件条件,或者应用环节中的各种因素的限制,研究成果较少应用于工程实践。工作装置的机构设计不合理,一般会导致挖掘力不足或者挖掘的工作范围不合理,甚至与底盘、驾驶室等本身的部件干涉;工作装置的冲击载荷大,会导致结构件的早期失效,同时导致驱动工作装置工作的液压缸、管线等出现多种失效现象或者导致工作效率低、耗油大;工作装置笨重,会导致有限的发动机功率浪费在对工作装置本身的做功上。更重要的是,盲目的强化设计仍然会导致各种结构失效问题。结合液压挖掘机工作装置的设计要求和工程中发现的失效现象,可以得出其工作装置设计中存在的共性问题包括液压挖掘机工作装置整体集成有限元分析方法、铰点设计、工作装置运动学和动力学综合优化等。随着大型和超大型挖掘机的不断涌现,合理地设计工作装置的主要构件更加重要。

综上所述,我国挖掘机企业人才流失、资金不足、技术不高,造成自主研发能力不高、设计方法落后;而改革开放后的合资企业和外资企业,只是根据国外的设计图纸进

行批量生产,基本不进行设计,所以我国的挖掘机设计比较落后,常常凭借经验进行设计制造,造成生产的挖掘机存在一些缺陷,在三包期间常出现故障,做不到等寿命设计,对厂商和买家造成不小的经济损失。所以有必要结合现代设计方法、虚拟样机技术、仿真技术、性能测试理论等多学科综合知识,探索一种全新的、适应性强、可信度高的液压挖掘机工作装置设计方法,提高挖掘机的设计水平,减少厂商和买家的损失。

### 1.3 小 结

本章概括了液压挖掘机的工作原理、基本组成、基本类型及特点;分析了挖掘机工作装置的研究意义;介绍了国内外对液压挖掘机工作装置的研究现状;提出了对液压挖掘机工作装置的关键技术进行深入研究必要性。本书的后面章节将具体论述研究内容,包括液压挖掘机挖掘性能分析、液压挖掘机工作装置优化、液压挖掘机性能测试与分析、液压挖掘机工作装置结构强度分析及结构优化设计和基于动态测试的正铲液压挖掘工作装置疲劳寿命研究五大部分。



## 第 2 章 液压挖掘机性能分析

本章分别对反铲、正铲及反铲中的伸缩臂液压挖掘机进行性能分析。通过分析工作装置的机构特点，应用运动学和动力学建立位置及力学数学模型，编程实现对各种挖掘机的性能分析，并通过实例进行详细论述，为后续的机构优化及强度分析建立基础。

### 2.1 反铲工作装置

液压挖掘机是一种完成周期性土方作业的机械，其作业过程可简单概括为以下几个典型动作的连续过程：挖掘（切土并装上）→满斗提升动臂/回转→卸料→空斗返回并下降动臂→下一次挖掘。其一个作业循环包括挖掘、满斗回转、卸料和空斗返回过程。

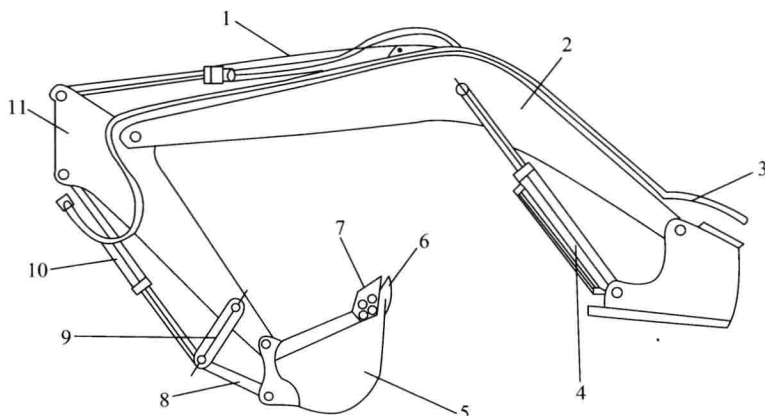


图 2.1 反铲液压挖掘机工作装置结构图

1-斗杆油缸；2-动臂；3-油管；4-动臂油缸；5-铲斗；6-斗齿；7-测齿；8-连杆；9-摇杆；10-铲斗油缸；11-斗杆

反铲液压挖掘机工作装置是挖掘机最主要的作业工具之一，其工作装置如图 2.1 所示，其主要结构包括动臂、斗杆、铲斗以及动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸。动臂是反铲工作装置的主要部件之一，按照外形特征可分为直动臂和弯动臂。弯动臂是目前应用广泛的结构形式，与同长度的直动臂相比，可以使挖掘机有较大的挖掘深度，且降低了卸土高度，这也符合挖掘机反铲作业的要求。反铲液压挖掘机的斗杆一般为左右对称、宽度相等、直臂整体式封闭箱型焊接结构件。这种直臂形式结构简单，同时也可以达到较大的挖掘范围。当需要改变挖掘范围或作业尺寸时，一般采用更换斗杆的方法，或者在斗杆上设置若干可供调节选择的与动臂端部铰接的孔。铲斗整体一般为纵向对称结构，由于物料的复杂性，同一种铲斗很难适应不同的物料，根据不同的作业需要，在同一种挖掘机上往往配以多种结构形式的铲斗。动臂液压缸可分为双动臂液压缸和单动臂液压缸，在动臂、斗杆、铲斗长度相等且作业范围



相同的情况下, 双动臂液压缸的弯角较大, 动臂的受力状况较好, 在运输状态下, 工作装置的高度也较低。用缸径较小的液压缸作为双动臂液压缸可以提高挖掘机的提升力, 同时也有利于配套件的选型。在总液压缸推力相同的情况下, 单液压缸具有更好的压杆稳定性, 同时其成本较低。对于反铲液压挖掘机, 其斗杆液压缸一般置于动臂和斗杆的上方, 保证反铲液压挖掘机在挖掘作业过程中斗杆液压缸的大腔参与工作, 以产生较大的挖掘力; 另一方面, 在一定程度上可避免挖掘地面以下部分时带来的干涉现象。铲斗液压缸的作用力分直接和间接两种。就目前来看, 大多数反铲液压挖掘机的铲斗液压缸都不直接与铲斗相连, 而是通过中间部件(摇臂和连杆)与铲斗相连。根据有无中间部件及中间部件的结构形式, 一般将铲斗连杆机构分为四连杆机构和六连杆结构。

反铲液压挖掘机多用于停机面以下的土壤挖掘。作业时, 首先操作控制手柄使动臂和斗杆摆动(一般为下降), 将铲斗落在要求挖掘的位置上, 同时使铲斗向前转动, 然后铲斗绕斗杆向挖掘机机身方向转动进行切土, 在此过程中, 在工作面上会形成一条弧形切削面, 并同时土壤装满铲斗。随后, 满载的铲斗将连同动臂一起被提起, 与此同时, 上部转台转动并带动动臂、斗杆和铲斗一起回转卸料位置。在卸料位置, 操作控制阀使铲斗向前上方转动, 使斗口朝下进行卸料。完成卸料后, 上部转台反方向回转并带动动臂、斗杆和铲斗转动, 与此同时, 动臂下降, 斗杆下摆, 使铲斗置于下一个挖掘位置, 以进行下一循环的挖掘作业。

### 2.1.1 机构特点及运动分析

反铲液压挖掘机工作装置由动臂、斗杆、铲斗以及动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸等组成。其构造特点是各部件之间的联系全部采用铰接。动臂的下铰点与转台铰接, 并以动臂油缸来支撑, 通过动臂油缸的伸缩可使动臂绕下铰点转动而升降。斗杆铰接于动臂上端, 斗杆与动臂的相对位置由斗杆油缸控制, 当斗杆油缸伸缩时, 斗杆可以绕动臂上铰点转动。铲斗与斗杆前端铰接, 通过铲斗油缸伸缩使铲斗绕该点转动(为增大铲斗的转角, 通常以六连杆机构与铲斗链接)。

#### 1. 工作装置的结构形式和挖掘特点

动臂和动臂油缸、斗杆和斗杆油缸、铲斗和铲斗油缸分别组成动臂机构、斗杆机构和铲斗机构。动臂和斗杆机构均为四杆机构, 铲斗机构是由铲斗、铲斗油缸、连杆及摇杆组成的六杆机构。整个工作装置共有 11 个活动件、15 个低副, 其自由度为  $F=3 \times 11 - 2 \times 15 = 3$ , 即三组液压缸的相对运动, 驱使挖掘机工作装置完成作业, 实现挖掘、转斗、提升、卸载等动作。

反铲挖掘机可以根据需要采用铲斗油缸或者斗杆油缸挖掘。对反铲液压挖掘机来说必须保证挖掘过程中铲斗和斗杆油缸能够产生必要的挖掘力, 同时也要考虑动臂油缸的提升能力、挖掘过程中其他被动油缸的闭锁能力以及整机的稳定性和地面附着条件等。这些都是保证反铲挖掘机工作可靠性的必要条件。