



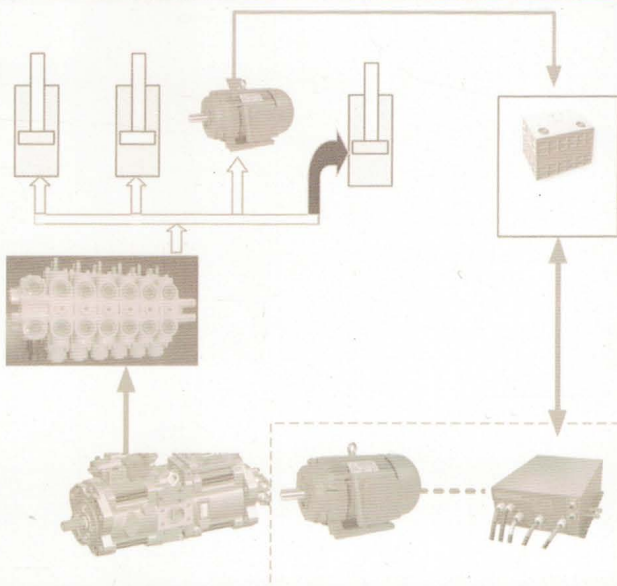
节能减排技术丛书

GONGCHENG JIXIE JIENENG JISHU JI YINGYONG



# 工程机械节能技术及应用

林添良 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



节能减排技术丛书

# 工程机械节能技术及应用

林添良 编 著



机械工业出版社

本书从工程应用角度对工程机械节能与能量回收技术进行了系统的、深入浅出的详细介绍,全面总结了作者及国内外工程机械节能与能量回收技术研制的最新成果、典型案例,并对其优缺点进行分析比较,是目前国内较为完善和系统介绍工程机械节能与能量回收技术的书籍。全书共分八章,首先分析了工程机械的主要能耗与节能途径,随后介绍了工程机械的动力节能技术和液压节能技术,然后对能量回收技术进行简要介绍,重点对电气式能量回收系统、液压式能量回收系统及能量回收技术在非负载的应用等进行了详细阐述,最后总结了能量回收技术的关键技术与发展趋势。

本书为有志于提高工程机械能量利用率的技术人员提供了研究方向、目标、方法和案例,可作为机械工程类专业本科生、研究生的教材或主要参考书,也可作为专业技术人员和管理人员的专业培训用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程机械节能技术及应用/林添良编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 9

(节能减排技术丛书)

ISBN 978-7-111-58291-5

I. ①工… II. ①林… III. ①工程机械-节能 IV. ①TH2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 253785 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:张秀恩

责任编辑:张秀恩

责任校对:刘志文 肖琳 封面设计:陈沛

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 26.25 印张 · 534 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58291-5

定价: 89.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

随着经济的发展，全球变暖和能源问题日益突出，日趋严格的工程机械排放法规促使工程机械行业必须解决目前油耗大、排放差的问题。针对工程机械的节能和能量回收技术，国内外众多学者和研究机构都进行了相关的研究，也取得了一定的成果，但没有一本专业书籍将这些技术进行总结。受限于资源获取途径和从事专业的限制，从事工程机械节能和能量回收的研究人员一方面不能全面获取相关资料，另一方面，对于所获取的资料不能进行全面的评价。本书作者自2006年开始，在国内进行了工程节能和能量回收的研究，与日本小松，国内的三一、中联、徐工、厦工、力士德等著名工程机械生产厂家进行了深入的合作，与国内外的研究机构也有技术方面的深入交流。作者总结了十余年的研究心得，并对当前的研究现状、关键技术、未来发展趋势进行了全面分析，编著了《工程机械节能技术及应用》一书，以期为从事工程机械节能和能量回收技术的科研人员和技术人员提供参考，并提供新的研究思路。

本书按照工程机械的节能途径展开，力求全面、系统地分析工程机械的能耗、可回收的能量及节能的途径，介绍节能的基本理论与方法，分析能量回收的各种结构方案、应用实例及系统优缺点。第1章对工程机械的节能技术进行了概述，主要介绍了工程机械节能的意义，以挖掘机为例，分析了工程机械的能量流和可回收的能量，并对工程机械的节能技术进行了总体介绍；第2章重点对动力系统的节能技术进行了详细介绍，主要阐述了传统发动机的功率匹配技术、油电混合动力技术、液压混合动力技术、纯电驱动技术、电喷发动机等技术，尤其对各种技术的结构方案、特点、典型应用及各技术之间的异同等进行了详细的阐述，并对天然气发动机和氢气发动机等新兴技术进行了介绍；第3章介绍了液压节能技术，主要阐述了正流量、负流量、恒功率控制、负载敏感系统、负载口独立调节系统、基于二次调节技术和变压器的节能系统、多泵系统、基于高速开关阀的系统和基于二通矩阵的工程机械液压系统等各种技术的工作原理、节能特性，并介绍了主要的研究进展和应用；第4章对能量回收系统进行简要介绍，主要介绍了能量回收对象的类型、储能元件的特性、能量转换单元的工作原理、能量回收系统的分类等，重点阐述了汽车能量回收技术在工程机械上进行移植的可行性及作业型挖掘机和行走型装载机的能量回收技术异同点等；第5章对电气式能量回收系统进行介绍，重点分析了电气式回收系统的特性和能量转换单元的效率特性等，着重阐述了电气式能量回收系统的关键技术、动臂势能和回转制动能量的电气式能量回收的研究进展；第6章对液压式能量回收系统进行了简单介绍，深刻剖析了液压式能量回收技术的难点和再利用

技术的分类与研究进展；第7章重点讨论了能量回收技术在非负负载上的应用，创新性地提出了对溢流损耗能量进行回收的可行性和实现方案、节流阀口的压差损耗能量回收及自动怠速能量回收的工作原理、控制策略，并针对闲散动能的能量回收技术进行了简单介绍；第8章重点讨论了能量回收技术的关键技术和发展趋势，对能量回收技术的未来发展进行了深刻的思考和积极的探索。

本书虽然是对现有节能技术和能量回收技术的总结，但融合了作者十余年从事该领域研究的经验和思考，对于很多现有的技术方案，并不是一味地简单照搬，而是进行了有意义的评析，分析了方案的优缺点、应用场合及与其他方案的对比，力求使读者能够通过阅读本书，选择合适的技术方案进行工程机械节能与能量回收的技术方案选择。而且，本书中的一些方案和结构属于作者的原创性成果，是首次见诸于中文资料，也希望与读者共同探讨。

浙江大学王庆丰教授团队为本书提供了翔实的资料；太原理工大学权龙教授细致地审阅了全书初稿，并给予了中肯的修改意见；哈尔滨工业大学姜继海教授对本文的一些观点给予了中肯的评价。

感谢所有从事工程机械节能与能量回收研究的学者，尤其是本书所有引用的参考文献的作者，为本书的写作提供的基本素材。感谢作者所有课题组的老师和研究生为本书的初稿提出的一些具有建设性的意见，并绘制部分插图和对本书的文字工作所做的基本修订。由于本书的字数较多，参考文献众多，对一些相近的研究，只给出了一部分的参考文献，没有在书中进行详细的罗列，还有一部分参考文献可能存在漏注现象，恳请相关作者的谅解。

作者

# 目 录

## 前 言

## 第 1 章 工程机械能耗分析与节能

### 途径 ..... 1

- 1.1 工程机械节能的意义 ..... 1
- 1.2 液压挖掘机液压系统概述 ..... 3
  - 1.2.1 液压系统工作原理 ..... 4
  - 1.2.2 功能控制油路 ..... 8
- 1.3 液压挖掘机能耗分析 ..... 13
  - 1.3.1 仿真模型法 ..... 13
  - 1.3.2 测试样机法 ..... 18
  - 1.3.3 能量流分析法 ..... 34
- 1.4 液压挖掘机各执行机构的可回收能量和工况分析 ..... 39
  - 1.4.1 各执行机构的可回收能量分析 ..... 39
  - 1.4.2 动臂驱动液压缸可回收工况的特性分析 ..... 43
  - 1.4.3 上车机构可回收工况的特性分析 ..... 45
- 1.5 工程机械节能途径 ..... 46
  - 1.5.1 动力节能技术 ..... 46
  - 1.5.2 液压节能技术 ..... 47
  - 1.5.3 能量回收技术 ..... 47
- 参考文献 ..... 48

## 第 2 章 工程机械动力节能技术 ..... 49

- 2.1 基于传统发动机功率匹配的控制技术 ..... 49
  - 2.1.1 分工况控制 ..... 49
  - 2.1.2 转速感应控制 ..... 50
  - 2.1.3 自动怠速控制 ..... 51
  - 2.1.4 恒功率控制 ..... 51
  - 2.1.5 变功率控制 ..... 52

- 2.1.6 发动机的停缸控制 ..... 52
- 2.2 油电混合动力技术 ..... 54
  - 2.2.1 油电混合动力技术概述 ..... 54
  - 2.2.2 油电混合动力系统的优点 ..... 56
  - 2.2.3 油电混合动力技术的特点 ..... 57
  - 2.2.4 车辆混合动力技术在工程机械领域的移植性 ..... 61
  - 2.2.5 油电混合动力技术的研究进展 ..... 64
  - 2.2.6 油电混合动力技术的应用实例 ..... 77
- 2.3 液压混合动力技术 ..... 81
  - 2.3.1 液压混合动力技术概述 ..... 81
  - 2.3.2 工程机械液压混合技术和油电混合动力技术的异同点 ..... 82
  - 2.3.3 工程机械液压混合技术的瓶颈 ..... 82
  - 2.3.4 液压混合动力技术的研究进展 ..... 83
  - 2.3.5 液压混合动力装载机技术分析 ..... 90
- 2.4 纯电驱动技术 ..... 97
  - 2.4.1 纯电动的优点 ..... 97
  - 2.4.2 纯电动结构方案 ..... 99
  - 2.4.3 纯电动工程机械的关键技术 ..... 100
  - 2.4.4 纯电动挖掘机的研究进展 ..... 102
  - 2.4.5 纯电动挖掘机典型案例 ..... 105
- 2.5 电喷发动机应用技术 ..... 109
  - 2.5.1 电喷发动机与传统发动机调速特性的不同点 ..... 109
  - 2.5.2 电喷发动机阶跃加载试验及分析 ..... 110

2.6	液压自由活塞发动机技术	110	3.7.2	控制方式	163
2.7	天然气发动机技术	112	3.7.3	二次调节系统特性分析	166
2.7.1	CNG 发动机	112	3.7.4	优势分析	167
2.7.2	LNG 发动机	115	3.7.5	二次调节技术的发展	167
2.7.3	天然气发动机的应用	116	3.8	基于液压变压器的节能技术	169
2.8	氢气发动机	117	3.8.1	工作原理	170
参考文献		119	3.8.2	特性分析	171
<b>第3章</b>	<b>液压节能技术</b>	121	3.8.3	国内外研究现状	172
3.1	基于液压元件效率优化	121	3.8.4	液压变压器在工程机械中的 应用	176
3.1.1	液压泵的效率优化	122	3.9	多泵系统	177
3.1.2	液压控制元件的节能	123	3.9.1	工作原理	177
3.2	负流量、正流量系统	124	3.9.2	节能分析	178
3.2.1	负流量系统	124	3.9.3	多泵系统的应用	178
3.2.2	正流量系统	129	3.10	基于高速开关阀的液压 系统	179
3.2.3	新型复合流量控制系统	132	3.10.1	高速开关阀简介	179
3.3	恒功率控制	134	3.10.2	高速开关阀节能原理	180
3.3.1	全功率控制	135	3.10.3	高速开关阀的应用	180
3.3.2	分功率控制	136	3.11	基于二通矩阵的工程机械 液压系统	181
3.3.3	交叉功率控制	136	3.11.1	二通矩阵工程机械液压系 统节能原理	181
3.4	负载敏感系统	137	3.11.2	二通矩阵工程机械液压系 统的应用	181
3.4.1	工作原理	137	参考文献		183
3.4.2	节能特性分析	141	<b>第4章</b>	<b>能量回收系统简介</b>	186
3.4.3	操控特性分析	142	4.1	能量回收对象的类型	186
3.4.4	主要研究进展	143	4.1.1	负负载	187
3.5	负载口独立调节系统	145	4.1.2	非负负载	187
3.5.1	负载口独立调节工作原理	145	4.2	储能元件的类型和特性分析	188
3.5.2	负载口独立调节控制阀 简介	148	4.2.1	电量储存单元	188
3.5.3	负载口独立调节技术研究 进展	149	4.2.2	液压蓄能器	192
3.6	泵控液压系统	152	4.2.3	储能单元特性分析	194
3.6.1	变排量定转速控制	152	4.3	能量转换单元工作原理	196
3.6.2	变转速定排量控制	153	4.3.1	电动机/发电机	196
3.6.3	变转速变排量复合控制	155	4.3.2	液压泵/马达	203
3.6.4	泵控的应用分析	156	4.4	能量回收系统的分类	204
3.6.5	泵控在工程机械中的应用	161			
3.7	基于二次调节技术的节能	162			
3.7.1	工作原理	162			

4.4.1 无储能元件的能量回收系统 .....	206	5.3.1 能量回收效率 .....	252
4.4.2 机械式能量回收 .....	207	5.3.2 操控性能 .....	253
4.4.3 液压式能量回收 .....	209	5.3.3 经济性 .....	254
4.4.4 电气式能量回收 .....	211	5.4 动臂势能电气式回收系统发展动态 .....	254
4.4.5 复合式能量回收 .....	212	5.4.1 挖掘机领域研究进展 .....	254
4.5 汽车能量回收技术在工程机械上的移植性 .....	218	5.4.2 其他工程机械领域研究进展 .....	272
4.5.1 动臂势能回收系统 .....	218	5.5 回转制动电气式回收技术发展动态 .....	274
4.5.2 液压挖掘机上车机构回转制动能量回收系统 .....	220	5.5.1 传统液压回转系统特性分析 .....	274
4.5.3 装载机行走制动和汽车行走制动的异同点 .....	221	5.5.2 电动回转及能量回收系统 .....	276
4.6 作业型挖掘机和行走型装载机的能量回收技术异同点 .....	222	5.5.3 液压马达-发电机转台能量回收技术 .....	287
4.6.1 能量回收的来源和回收能量与驱动能量的比重不同 .....	222	5.5.4 液压马达-电动机回转复合驱动系统 .....	296
4.6.2 能量回收的途径不同 .....	223	参考文献 .....	299
4.6.3 能量回收的效率不同 .....	224		
4.6.4 能量回收的控制策略不同 .....	224		
参考文献 .....	225		
<b>第5章 电气式能量回收系统 .....</b>	<b>226</b>	<b>第6章 液压式能量回收系统 .....</b>	<b>303</b>
5.1 电气式回收系统特性分析 .....	226	6.1 液压蓄能器能量回收系统基本工作原理 .....	303
5.1.1 基本结构方案 .....	226	6.1.1 非流量控制阀 .....	303
5.1.2 系统建模及控制特性分析 .....	226	6.1.2 流量可控阀 .....	304
5.2 能量转换单元的效率特性分析及优化 .....	231	6.1.3 容积调速单元 .....	306
5.2.1 液压马达效率模型及分析 .....	232	6.2 液压式能量回收技术的难点 .....	306
5.2.2 永磁同步发电机效率模型及分析 .....	241	6.2.1 回收能量的再利用技术 .....	306
5.2.3 超级电容效率特性分析 .....	245	6.2.2 液压蓄能器压力的被动控制 .....	308
5.2.4 能量转化单元的效率优化控制策略 .....	250	6.2.3 防止不同压力等级液压油切换时压力冲击和节流损耗技术 .....	309
5.3 电气式能量回收系统的关键技术及经济性 .....	252	6.2.4 液压蓄能器的能量密度较低 .....	310
		6.2.5 液压蓄能器的效率特性 .....	311
		6.2.6 液压蓄能器的参数可调 .....	311
		6.2.7 液压蓄能器的安全性问题 .....	311

6.3 液压式能量回收再利用技术的分类及研究进展 .....	312	<b>第8章 能量回收技术的关键技术与发展趋势 .....</b>	<b>396</b>
6.3.1 基于液压控制阀的能量再利用 .....	312	8.1 能量回收技术的关键技术 .....	396
6.3.2 以液压蓄能器为动力油源的 能量再利用 .....	320	8.1.1 高效且具有良好操作性的动 臂势能快速回收技术 .....	396
6.3.3 基于马达或泵/马达的能量 回收技术 .....	328	8.1.2 具有大惯性和变转动惯量负 载特点的转台制动动能回 收技术 .....	397
6.3.4 基于二次调节技术 .....	332	8.1.3 不同可回收能量的耦合 .....	398
6.3.5 基于三通/四通液压泵的液 压回收技术 .....	333	8.1.4 整机和能量回收系统的耦 合单元 .....	399
6.3.6 基于二通矩阵的液压式能量 回收与释放系统 .....	337	8.1.5 整机和能量回收系统的全局 与局部协同优化管理技术 .....	400
6.3.7 基于平衡单元的回收技术 .....	338	8.1.6 储能单元的主动控制方法 .....	400
参考文献 .....	347	8.1.7 基于能量回收单元的执行元 件工作模式辨别 .....	401
<b>第7章 能量回收技术在非负负 载的应用 .....</b>	<b>349</b>	8.1.8 能量回收单元的控制方法 .....	401
7.1 溢流损耗能量回收技术 .....	349	8.1.9 基于能量回收单元的电液控 制及集成技术 .....	402
7.1.1 溢流损耗简介 .....	349	8.1.10 工程机械能量回收的评价 体系 .....	402
7.1.2 溢流损耗回收和再利用实现 方法 .....	351	8.2 能量回收技术的发展趋势 .....	403
7.1.3 能量回收单元对溢流功能工 作特性的影响规律 .....	356	8.2.1 高性能液压马达-发电机一 体化集成单元的突破 .....	403
7.2 节流阀口压差损耗能量回收 技术 .....	367	8.2.2 液压蓄能器-液压缸一体化 技术 .....	404
7.2.1 节流损耗简介 .....	367	8.2.3 新型液压蓄能器 .....	404
7.2.2 节流损耗回收和再利用 实现方法 .....	369	8.2.4 基于能量回收系统的液压控 掘机液压控制多路阀 .....	405
7.3 自动怠速能量回收技术 .....	370	8.2.5 基于电液平衡的能量回收 技术 .....	407
7.3.1 自动怠速能量损耗分析 .....	370	8.2.6 能量回收在液压压差的 应用 .....	408
7.3.2 新型自动怠速系统工作 原理 .....	371	8.2.7 能量回收在工程机械其他闲 散能量的应用 .....	410
7.3.3 新型自动怠速的数学 模型 .....	373	8.2.8 能量回收在非工程机械 领域的应用 .....	410
7.3.4 新型自动怠速的控制策略 .....	376	参考文献 .....	412
7.3.5 新型自动怠速的仿真 .....	383		
7.3.6 新型自动怠速试验 .....	389		
7.4 闲散动能能量回收技术 .....	393		
参考文献 .....	395		

# 第 1 章 工程机械能耗分析与节能途径

## 1.1 工程机械节能的意义

### (1) 能源危机和大气污染

自 1993 年以来,中国便成为石油净进口国,2013 年原油净进口达 2.92 亿 t,对外依存度高达 58%<sup>[1]</sup>。BP 石油公司发布的《BP 世界能源统计 2011》调查报告指出,2010 年中国一次能源消费总量为 24.32 亿 t 标准油,超过美国的 22.86 亿 t 标准油,已经成为世界第一大能源消费国。研究数据显示,一方面新发现储油地的进程较为缓慢,而另一方面,石油消耗量则呈现出较高的增长率;如果新发现的石油存储量及其消耗量依照现在的趋势,则全世界石油资源只可用到 2038 年。我国由于地理位置特殊,石油问题相对于其他发达国家更加严重。

从环境保护的角度来看,发动机排放物的数量与燃油消耗呈正相关关系,燃油内燃机车辆在大量消耗石油资源的同时又污染了环境,所排放的碳、氮、硫的氧化物及其他有害排放物已成为城市空气的主要污染源。

### (2) 日益严格的排放标准

放眼国际,美国已经对非道路排放标准实施了 Tier4 排放标准,欧盟也执行了欧 IV 排放标准。我国环境保护部也于 2014 年 5 月发布了《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)》(GB20891—2014)<sup>[2]</sup>,并规定自 2014 年 10 月 1 日起实行第三阶段排放要求,进一步减轻因为此类机械设备不断增长的保有量和使用量给环境带来的压力。

### (3) 工程机械油耗大和排放差

工程机械作为内燃机产品除汽车行业之外的第二大用户,由于所用发动机排量、油耗高,排放标准与汽车行业相比更为宽松,对环境的污染比其他内燃机使用行业更为严重。统计数据表明,全国以工程机械为主的非道路机械柴油机污染物排放量占总排放量的 38%<sup>[3]</sup>。以某型号 20t 挖掘机为例,一个小时耗油量在 20~30L 左右,相当于一辆小汽车行驶 300~450km 的耗油量;在正常工作相同时间内,一台 20t 挖掘机的废气排放量相当于 30 辆小型汽车的废气排放量。因此,工程机械行业节能减排的责任格外重大。

结合国务院办公厅 2013 年出台的《关于加强内燃机工业节能减排的意见》中针对内燃机发展趋势和目标,两年以后,内燃机产品中 60% 以上需使用环保节能型内燃机,比目前使用的内燃机油耗下降 6% 以上,噪声降低到一定程度。

#### (4) 节能减排符合国家发展规划

中国工程机械行业协会发布的“十二五”产业发展规划中，将“开展工程机械产品节能技术研究和工程机械产品能源多样性技术研究”作为“十二五”期间有所突破的重要发展目标。在“十二五”期间，节能减排，绿色制造成果丰硕。在节能技术方面实现轮式装载机节能5%~12%，液压挖掘机节能5%。减量化技术方面装载机、叉车等产品取得降低整机重量5%~8%的科研成果。减振降噪的科技攻关取得重大突破，装载机整机噪声降到72dB，液压挖掘机整机噪声降到71dB，达到了国际先进水平。全行业单位工业增加值综合能耗从2010年的0.0758t标煤/万元，到2014年下降为0.0688t标煤/万元，整体保持下降趋势。因此2016年3月28日发布的“十三五”产业发展规划中将绿色节能产品继续列为“十三五”期间行业需要重点开发的九大类创新产品之一，力争在“十三五”期间实现我国工程机械提质增效升级，产业能耗强度下降，综合利用率大幅提升。因此，从长远来看，工程机械节能环保型将是其进入市场的基本要素，工程机械节能技术给国家、社会乃至用户带来显著的经济社会效益。

#### (5) 液压挖掘机在工程机械行业的重要性

液压挖掘机作为工程建设中最主要的工程机械，承担的工种多，工作时间长。液压挖掘机作为国家基础建设的重要工程机械之一，已经广泛应用于建筑、交通、水利、矿山以及军事领域中。世界上各种土方工程约有65%~70%的土方量是由液压挖掘机来完成的。故无论从挖掘机强大的多功能适应性，还是在世界范围内的巨大发展潜力来看，均体现出其在建筑施工机械中的重要地位。因此，液压挖掘机的节能与减排已引起了人们的广泛关注与重视。液压挖掘机的工况复杂，负载变化剧烈，据研究报告，液压挖掘机中，发动机的输出能量的利用率大约只有20%。液压挖掘机作为一种工况最为复杂的典型工程机械，其各种节能技术给其他工程机械的节能研究和应用提供借鉴。故本书将重点介绍液压挖掘机，交叉介绍装载机、叉车、起重机等其他工程机械。

综上所述，工程机械节能技术已成为衡量其先进性的一项重要指标，在未来相当长的一段时间内，节能减排将成为工程机械行业的重要研究方向。在此背景下，国家在环保方面对工程机械企业实施一些技术整改制度，主要集中在排放标准的升级和新能源使用两个方面。环保型产品的研发已经关系到企业的生存与发展，工程机械企业纷纷围绕节能减排开始了技术升级。与此同时，中国工程机械行业开始了技术升级和创新，环保节能型产品是未来的发展方向。

此外，许多工程机械的共同特点是用一定重量的工作装置，将物料举升到指定高度后卸载，采用多路阀控制工作装置频繁地举升和下降会浪费许多能量，还有一些机构，如挖掘机的上车机构频繁地加速启动和减速制动，如果能够回收与利用工作机构举升后积累的势能和转台制动的动能，对提高工程机械的能量效率将非常有益，是当前工程机械节能技术研究的热点方向。研究工程机械的动力节能技术、液

压节能技术辅以能量回收技术可以全面提高整机的节能性，对整机的节能研究具有重要的实际意义。

## 1.2 液压挖掘机液压系统概述

液压挖掘机作为国家基础建设的重要工程机械之一，已经广泛应用于建筑、交通、水利、矿山以及军事领域中，是工程机械的主力机种。挖掘机的类型很多，按土方斗数，可分为单斗挖掘机和多斗挖掘机；按结构特性，可分为正铲式、反铲式、拉铲式等。其中，单斗液压挖掘机是一种采用液压传动并以一个铲斗进行挖掘作业的机械，是目前挖掘机械中最重要的品种。单斗液压挖掘机由工作装置、回转机构及行走机构三部分组成。工作装置包括动臂、斗杆及铲斗，若更换工作装置，还可进行正铲、抓斗及装载作业。上述所有机构的动作均由液压驱动。

如图 1-1 所示，以日立 ZAXIS200 中型液压挖掘机为例说明液压挖掘机的工作原理及特点。液压挖掘机的执行机构包括行走机构、回转机构、动臂、斗杆和铲斗等，分别由左行走液压马达、右行走液压马达、回转液压马达、动臂液压缸、斗杆液压缸和铲斗液压缸驱动。由发动机驱动两个液压泵，并将压力油输送到两组多路阀中，操纵多路阀，将压力油送往直线与旋转运动的元件，以完成挖掘、回转、卸载、返回及行走等动作。其工作循环主要包括以下 4 种动作。

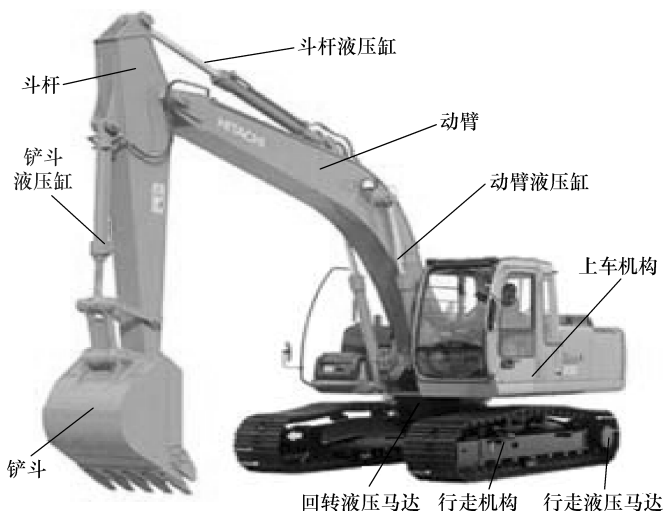


图 1-1 日立 ZAXIS200 中型液压挖掘机

### (1) 挖掘

一般以斗杆液压缸动作为主，用铲斗液压缸调整切削角度，配合挖掘。必要时（如铲平基坑底面或修整斜坡等有特殊要求的挖掘动作），铲斗、斗杆、动臂三个液压缸须根据作业要求复合动作，以保证铲斗按特定轨迹运动。

### (2) 满斗提升及回转

挖掘结束时，铲斗液压缸推出，动臂液压缸顶起，满斗提升。同时，回转液压马达转动，驱动转台向卸载位置旋转。

### (3) 卸载

当转台回转到卸载位置时，回转停止。通过动臂液压缸和铲斗液压缸配合动作调整铲斗卸载位置。然后，铲斗液压缸内缩，铲斗向上翻转卸载。

### (4) 返回

卸载结束后，转台反转，配以动臂液压缸、斗杆液压缸及铲斗液压缸的复合动作，将空斗返回到新的挖掘位置，开始下一个工作循环。

## 1.2.1 液压系统工作原理

### 1. 液压系统概述

液压挖掘机液压系统的类型很多。按主液压泵的数量、功率调节方式和回路的数量可分为单泵或双泵单路定量系统、双泵双路定量系统、多泵多路定量系统、双泵双路分功率调节变量系统、双泵双路全功率调节变量系统等；按液流循环方式可分为开式系统、闭式系统。日立 ZAXIS200 中型液压挖掘机的先导控制油路如图 1-2 所示，整体的液压原理图如图 1-3 所示。

为了简化液压系统，本书不介绍先导控制油路，直接给出主油路中各控制油路的含义。该系统的主要配置如下。

- 发动机采用了五十铃发动机 AA-6BG1TRA，功率输出为 110kW/2100r/min。
- 该系统为高压双泵双路全功率调节变量开式系统，该系统由主泵、先导泵、控制阀、两个动臂液压缸、斗杆液压缸、铲斗液压缸、回转液压马达、两个行走液压马达、液压油箱、压力传感器以及一些管道辅件组成。
- 主泵 1、2 均为斜轴式变量轴向柱塞泵，型号为 HPV102GW-RH23A，其排量为  $2 \times 102\text{mL/r}$ ，最大流量为  $2 \times 198.9\text{L/min}$ ，变量方式通过比例电磁阀控制泵的斜盘倾角实现。
- 先导泵为齿轮定量泵，型号为 HY/ZFS 11/16.8，最大流量为  $32.8\text{L/min}$ 。
- 多路阀型号为 KVMG-270-HE，先导控制式（4 阀柱 + 5 阀柱），系统油路中有主溢流阀和带有补油功能的过载溢流阀。主溢流阀具有两级压力溢流功能。当先导压力油不供给油口 SG 时，执行元件例如液压马达和液压缸工作时，主溢流阀防止主油路内的压力升高到设定压力以上从而防止管路泄漏和执行元件的损坏，此时系统最高压力为  $34.3\text{MPa}$ （流量为  $110\text{L/min}$ ）；当动力加力开关打开后 8s 内 MC 连续激励将先导压力油传送到油口 SG 通过活塞压缩弹簧，然后弹簧的力增加，使溢流阀的设定压力增加，此时系统压力为  $36.3\text{MPa}$ ，当挖掘过程中碰到大的石块或树根时，可以使用该功能。
- 动臂、斗杆、铲斗和回转驱动油路都装有补油功能过载溢流阀。其中动臂、

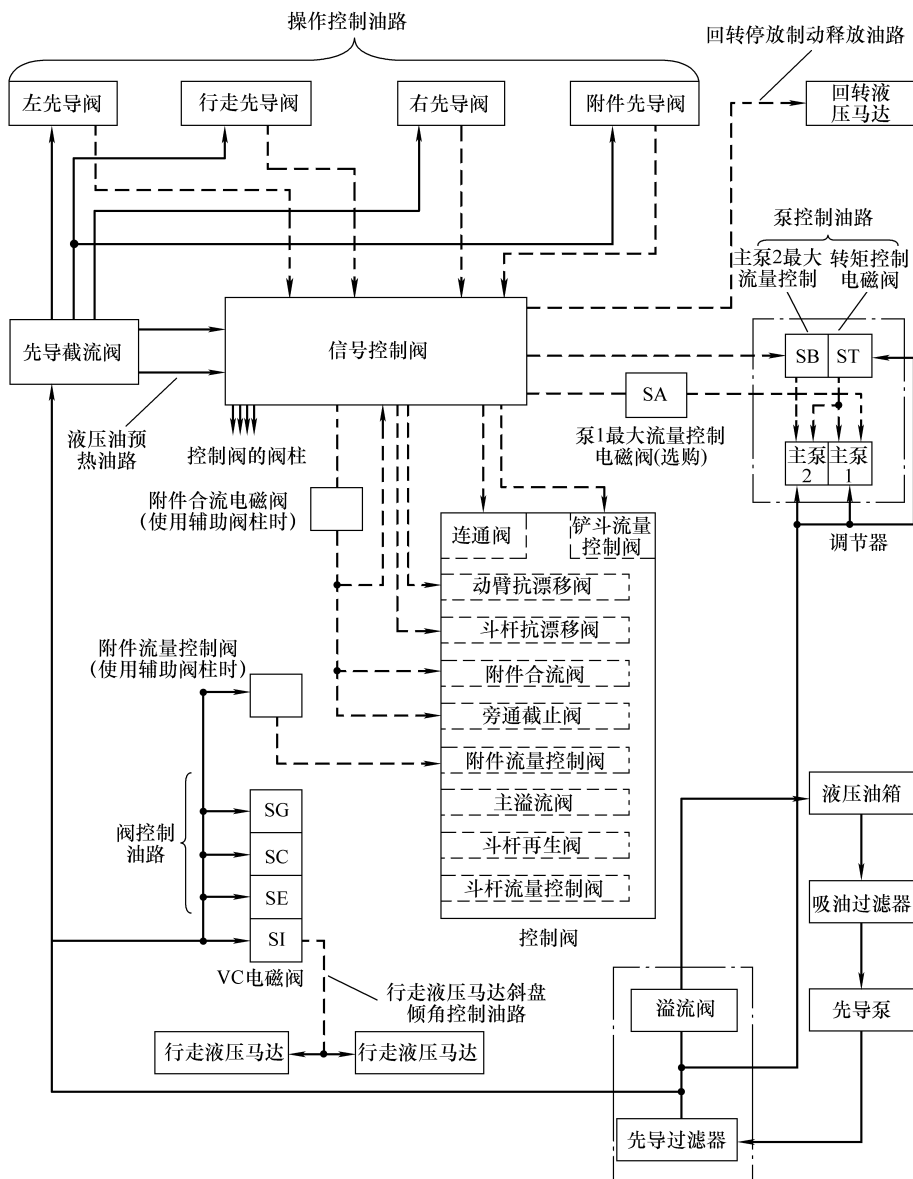


图 1-2 日立 ZAXIS200 中型液压挖掘机的先导控制油路

斗杆收回、铲斗翻入的过载压力为 37.3MPa (50L/min)，斗杆伸出和铲斗翻出的过载压力为 39.2MPa (50L/min)。当执行元件被外部负荷移动时，过载溢流阀控制执行元件油路的压力不会异常增高，另外当执行元件油路的压力降低时，过载溢流阀补油防止产生气穴。

- 回转装置为两级行星齿轮减速，减速比为 13.385；回转液压马达为斜盘式定量轴向柱塞马达，型号为 M5X130C；回转制动溢流阀采用非平衡阀式，设定压



进行主动控制。

## 2. 主油路概述

当一个泵供多个执行元件同时动作时，因液压油首先向负载轻的执行元件流动，导致高负载的执行元件动作困难，因此需要对负载轻的执行元件控制阀杆进行节流。此外，液压挖掘机工况各种各样，复合动作较多，如掘削装载工况、平整地面工况、沟槽侧边掘削工况、双泵合流问题、直线行走问题等。在这样的要求下，如何向各执行元件供油，向哪个执行元件优先供油，如何实现合流，如何在作业装置同时动作时保持直线行走等，这些都需要对多路阀进行控制。多路阀内部流道构成了一个非常庞大且复杂的液压回路。主要回路如下。

### (1) 中位油路

当先导操作手柄在中位时，来自主泵的压力油通过多路阀和液压冷却器流回液压油箱。当液压油温度较低时，液压油粘度高，液压冷却器内液压油的流动阻力增大，进而打开旁通单向阀（有些挖掘机采用溢流阀）使液压油绕过液压冷却器直接流回液压油箱。当液压油的温度较高时，液压油的粘度降低，液压冷却器内液压油的流动阻力较小，冷却器的前后压差小于旁通单向阀的开启压力，高温液压油基本都通过冷却器进行散热后回油箱。当液压油温在较低和较高之间时，液压油根据油温动态分配通过旁通单向阀和冷却器的流量大小。但目前的油温冷却系统仍然是液压挖掘机一个重要难点。包括瞬时冷却功率的大小，回油流量的自动分配等都还没有得到较好的解决。

### (2) 单一作业油路

来自主泵1的压力油先后通过各单向阀、流量限制阀后分别流到右行走、铲斗、动臂1和斗杆2的各个阀柱；来自主泵2的压力油先后通过各单向阀、流量限制阀后流到回转、斗杆1、动臂2、附件和左行走的各个阀柱；动臂和斗杆由来自两个主泵的压力油经过合流后同时供给。

### (3) 复合作业油路

当回转和动臂提升同时作业时，动臂提升先导压力油移动动臂1和2的阀柱，主泵1的压力油经并联油路和动臂1阀柱流入动臂液压缸升起动臂；主泵2的压力油经回转阀柱流进回转液压马达，同时泵2的压力油流经并联油路与泵1的压力油合流流进动臂液压缸升起动臂。

当行走和斗杆收回同时作业时，收回斗杆先导压力油移动行走斗杆1和斗杆2的阀柱，来自先导控制阀组内的压力油通过油口SL流到连通阀控制腔打开连通阀；来自主泵1的压力油流经右行走阀柱驱动右行走液压马达，同时来自主泵1的压力油流经连通阀和左行走阀柱并驱动左行走液压马达；来自2的压力油通过斗杆1阀柱流进斗杆液压缸收回斗杆。因此只用主泵2的压力油收回斗杆，来自主泵1的压力油均衡地流到左右行走液压马达以确保挖掘机能直线行走。

## 1.2.2 功能控制油路

### 1. 主变量泵控制回路

该系统是由两台轴向变量活塞泵、先导泵及各控制阀组成的。变量泵中的伺服阀由伺服活塞和导向滑阀组成，其作用是增大或减小变量泵的输出流量。主泵的控制回路如图 1-4 所示，该系统变量泵采用了正流量控制、全功率控制、速度传感控制和慢速转矩增加控制等。

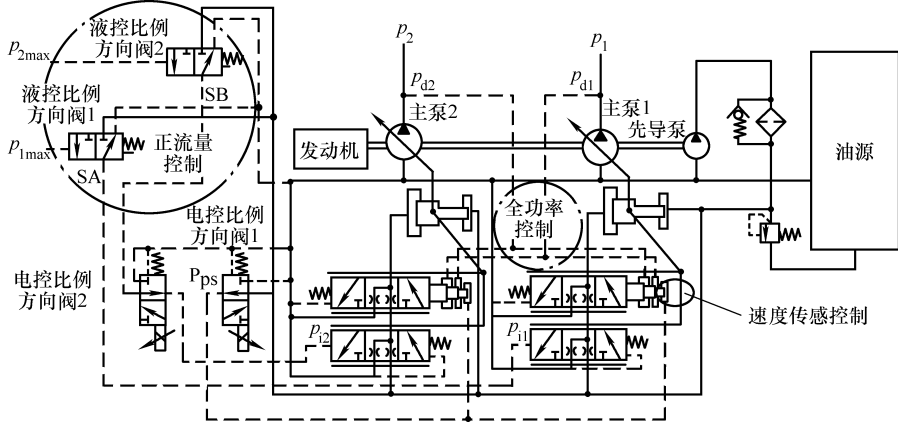


图 1-4 ZAXIS200 液压挖掘机主泵排量控制回路

#### (1) 正流量控制

正流量控制是利用操纵手柄的先导压力对泵排量直接控制。用六通多路阀控制液压缸的速度和方向。通过梭阀组将最大先导压力选择出来，用以控制液压泵排量。主泵 1 由梭阀选择表征动臂提升和下降、斗杆收回和伸出、铲斗翻上和翻出以及右行走的先导操作最大压力  $p_{1max}$ ，主泵 2 由梭阀选择表征动臂提升、斗杆收回和伸出、左回转和右回转、附件操作以及左行走的先导操作最大压力  $p_{2max}$ ；然后被选择的压力油流向主泵 1 流量控制阀（液控比例方向阀 1）或主泵 2 流量控制阀（液控比例方向阀 2）移动流量控制阀阀芯；当主泵 1 流量控制阀或主泵 2 流量控制阀移动时，来自先导泵的先导压力油流向主泵 1 或主泵 2 的调节器，此时的主泵控制压力称为  $p_i$ 。如图 1-5 所示，当先导手柄操作时，泵流量控制阀根据先导操作手柄的行程调节主泵的控制压力  $p_i$ ；然后当调节器收到泵的控制压力  $p_i$  时，调节器依照泵控制压力  $p_i$  的大小调整泵的流量；当先导操作手柄操作时泵控制压力  $p_i$  增

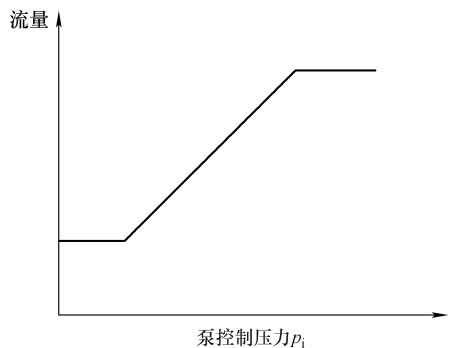


图 1-5 正流量控制系统  $p-q$  示意图