

工程机械液压控制 新技术

韩慧仙
著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

工程机械液压控制 新技术

韩慧仙 著

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

工程机械液压控制新技术 / 韩慧仙著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 7

ISBN 978 - 7 - 5682 - 4473 - 2

I. ①工… II. ①韩… III. ①工程机械 - 液压传动系统 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 183153 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京富达印务有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/32

印 张 / 13

责任编辑 / 孟雯雯

字 数 / 165 千字

文案编辑 / 多海鹏

版 次 / 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 68.00 元

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

近年来,我国的工程机械行业飞速发展,各种先进技术层出不穷,针对工程机械相关技术的研究和技术开发也取得了丰硕的成果。工程机械相关的新技术主要包括以下几方面:

➤ 工程机械动力总成技术,主要用于优化整机系统的匹配;

➤ 工程机械电液控制技术,主要用于提高工程机械的可控性;

➤ 工程机械数字控制技术,主要用于工作装置的高精度控制;

➤ 工程机械多执行机构控制技术,主要用于提高作业生产率。

本书的主要内容涵盖了挖掘机、起重机、混凝土泵车等工程机械主要门类和机型的液压传动系统及其动力传动和控制系统的最新技术状态和发展方向,主要阐述了以下几方面的内容:挖掘机、起重机等工程机械动力传动链的分析、计算、设计、仿真、节能等方面的研究;针对工程机械作业质量要求和工作特点等电气-液压系统融合控制解决方案的研究,包括发动机、机械传动系统、液压传动系统、多执行机构复合作业在内的工程机械动力总成系统等研究;长臂架类工程机械执行机构的高精度控制系统研究,包括机构的机械动力学特性研究、电控检测和传感技术研究、分布式实时控制系统的研究、数字液压控制系统的研究等。

本书可作为国内工程机械企业研发人员的参考书,也可作为高等院校工程机械相关专业的教学用书。

本书的内容大多是阐述工程机械等最新技术，其中很多技术还在不断探索和快速迭代中，加之作者研究时间和技术水平所限，疏漏甚至错误在所难免，在此恳请读者给予批评指正，不胜感激。

著 者

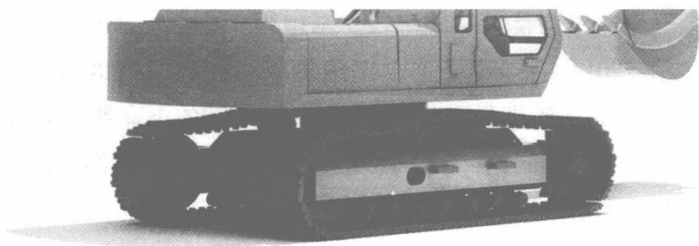
目 录

第一章 绪论	1
1.1 工程机械概述	3
1.2 工程机械作业工况概述	5
1.3 工程机械液压控制系统概述	8
第二章 挖掘机工作装置液压控制新技术	15
2.1 挖掘机工作装置液压系统的主要 技术	17
2.2 负流量控制技术	28
2.3 正流量控制技术	33
2.4 负荷传感系统控制技术	38
2.5 挖掘机液压系统几种技术路线的 优势分析	54
第三章 工程机械电液控制新技术	63
3.1 工程机械电液控制技术概述	65
3.2 工程机械液压比例控制技术	69
3.3 基于阀芯压差反馈的电液控制技术	81
3.4 基于插装阀的电液控制技术	97
第四章 工程机械功率匹配与控制新技术	111
4.1 工程机械功率匹配与控制概述	113
4.2 工作装置动力总成的匹配与 控制技术	119
4.3 工作装置动力总成的匹配与控制 试验分析	138

第五章 工程机械数字液压控制新技术	143
5.1 工程机械数字液压技术概述	145
5.2 数字液压元件设计和系统测试技术 ...	147
5.3 泵车臂架数字液压控制技术	164
参考文献	200

第一章 绪 论





1.1 工程机械概述

工程机械是一类机械设备和作业车辆的总称，具体包括挖掘机械、掘进机械、铲土运输机械、工程起重机械、工业车辆、压实机械、桩工机械、混凝土机械、钢筋与预应力机械、路面与养护机械、装修机械、高处作业机械、凿岩机械、气动工具、铁路施工和养护机械、电梯和扶梯、市政工程与环卫机械、军用工程机械、工程机械用零部件，以及其他专用工程机械，总共分为 20 个类别。

过去几十年，特别是改革开放以来，我国的工程机械行业持续超高速增长，2011 年前我国工程机械行业的销售额和销售量发展速度都非常快，到 2011 年，双双达到了全行业的最高峰。2011 年，我国主要工程机械企业的销售额达到了创纪录的 4 317 亿元，是 2000 年的 18 倍；2011 年，全行业的销售量达到了十分惊人的近 100 万台（为 975 130 台），是 2000 年的近 14 倍。这十余年间，整个行业年销售额最高年增幅达 53.7%，平均年增幅达 30.9%；销售量最高年增幅达 58.1%，平均年增幅达 27.7%。2000—2011 年，整个行业年销售额及年销售量均呈超高速迅猛增长，这在世界工程机械发展史上是绝无仅有的。特别是 2007 年、2010 年，在基数很大的情况下，销售额及销售量均呈 40% 以上的超高速增长，被业内人士一次又一次地喻为井喷式超高速发展。

经过十年的高速发展，从 2012 年开始，我国工程机械行业进入了

一个滞销调整的发展阶段。据中国工程机械工业协会历年统计资料显示,2012 年,86 家企业年销售收入同比下降 8.16%,利润总额下降 35.44%,销售利润率由 2010 年的 10.78%下降到 5.9%;2013 年,93 家企业与上年同比,销售收入又下降 11.74%,利润总额下降 32.56%,盈利能力滑坡远大于销售收入。到 2016 年四季度,挖掘机、起重机、混凝土泵车等行业逐步触底回升,工程机械行业呈现逐步回暖迹象。

我国的工程机械工业,在国内已经发展成为机械工业 10 大行业之一,在世界上我国也进入了工程机械生产大国行列。

世界领先的工程机械信息提供商英国 KHL 集团旗下《国际建设》杂志(International Construction)发布 2015 年全球工程机械制造商 50 强排行榜(2015 YellowTable),卡特彼勒(Caterpillar)继续稳居榜单首位,中国有 8 家企业上榜,徐工集团排名第八,位居中国企业首位。2015 年全球工程机械 10 强名单见表 1-1。我国也有 8 家工程机械企业进入 2015 年全球工程机械制造商 50 强,名单见表 1-2。

表 1-1 2015 年全球工程机械 10 强名单

世界排名	公司名称	总部所在地	销售额/亿美元	市场份额/%
1	卡特彼勒 (Caterpillar)	美国	282.83	17.8
2	小松 (Komatsu)	日本	168.77	10.6
3	日立建机 (Hitachi Construction Machinery)	日本	77.90	4.9
4	沃尔沃建筑设备 (Volvo Construction Equipment)	瑞典	77.85	4.9
5	特雷克斯 (Terex)	美国	73.09	4.6
6	利勃海尔 (Liebherr)	德国	71.29	4.5
7	迪尔 (John Deere)	美国	65.81	4.1
8	徐工集团 (XCMG)	中国	61.51	3.9
9	三一重工 (SANY)	中国	54.24	3.4
10	斗山工程机械 (Doosan Infracore)	韩国	54.14	3.4

表 1-2 2015 年中国工程机械进入全球 50 强名单

世界排名	公司名称	销售额/亿美元
8	徐工集团	61.51
9	三一重工	54.24
11	中联重科	43.76
22	柳工集团	13.76
29	龙工控股	12.57
31	山推股份	12.33
38	厦工机械	7.17
47	山河智能	2.84

预计未来几年，我国工程机械行业将继续呈现平稳健康发展的新常态，如图 1-1 所示。

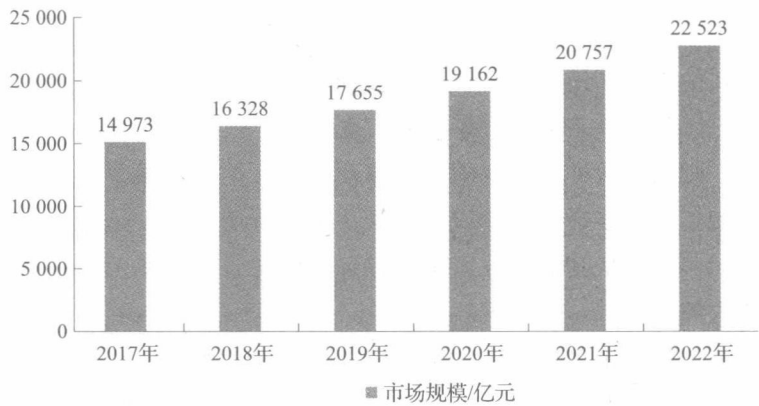


图 1-1 2014—2022 年我国工程机械行业市场规模预测

1.2 工程机械作业工况概述

工程机械的种类繁多，大多在野外或工地进行施工作业，其作业特点和对机械性能的要求如下：

(1) 我国法规对工程质量的要求逐渐提高,对工程机械作业质量的要求也越来越高,机电液一体化技术在主要工程机械上得到了广泛的应用。如,公路路面施工的平整度、路面的承载能力和使用寿命,对路面机械的各项性能指标都提出了十分严格的要求。其作业质量控制的对策主要有两条:一是加快施工机械作业原理的研究,二是采用最新的机电液一体化技术提高机械的作业质量或性能。

(2) 工程机械的作业工况十分复杂,作业和施工对象差异很大,经常在负载突变下施工作业,对工程机械的可靠性和适应能力提出了较高的性能要求。

例如装载机,其主要作业工况有铲土、运土、卸土、回程等。在铲土中铲斗可能会遇到树根或石块等较大的障碍物,另外,土壤的含水量、密实度、土壤颗粒的级配随作业位置和区域而变化,装载机工作过程中一直处于载荷大幅度变化甚至超负载的状态下工作。要确保装载机连续可靠的作业,不但要对装载机作业实行有效的控制,也要对装载机的设计和使用提出新的要求。

土方工程的施工种类繁多,分布也十分广泛。但按照其工程特点来分析,却只有两种最基本的施工作业方式:挖方和填方。所谓的挖方是指把工地上多余的土方挖掉并且移走;所谓的填方是指在施工工地作业时,需要从其他地方运送土方到本公司,并将本工地的地面修筑到要求的形状。

石方工程分布也很广泛,而且往往与土方工程相伴交叉出现,即土方工程中含有石方工程,石方工程中含有土方工程(如建筑场地平整工程、路基建设工程等);也有单纯的石方工程,如隧道工程、建筑石料开采工程、井下矿山巷道掘进工程、井下采矿工程、露天金属矿采矿工程等。石方工程施工工艺比较复杂。首先是破碎岩石,一般有三种方法:一是钻爆法;二是机械切削法;三是钻孔静态破碎法。

在石方工程中,广泛采用钻爆法施工,其他两种方法很少用。其中机械切削法的破岩工序主要采用联合掘进机、岩石切削机、液压冲

击器等设备。钻孔静态破碎法的破岩原理为：钻孔后注入静态破碎剂，靠其产生的膨胀力、破碎力、放电破碎力等相应能量破碎岩石。

流动起重装卸工程，包括建筑、安装工程中的起重、调整工程，港口、车站以及各种企业生产过程中的起重装卸工程等。所用的各种工程起重机、建筑起重机以及各种叉车和其他搬运机械，能够根据工程要求而自由地移动，不受作业地点限制，故亦称流动起重装卸机械。

另外，还有人货升降输送工程（垂直或倾斜升降），包括在高层建筑物对人的升降运送和对货物的升降运输，采用载人电梯、扶梯和载货电梯等。

各种建筑工程范围更为广泛，除房屋建筑和市政建设外，还包括公路、铁路、机场、水坝、隧道、地下港口、地下管线、新城建设和旧城改造等各种基础设施工程，需要通过各种工程机械进行施工。

综合机械化施工，是指工程工序均用相应成套的工程机械去完成，人力在工程中只起辅助和组织管理作用。综合机械化水平越高，则使用的人力就越少。

相关的工业生产过程，是指与土方工程、石方工程、流动起重装卸工程、人货升降运送工程和各种建筑工程有关的工业生产过程。如储煤场的装卸工程、工业企业内部生产过程的装卸与运输、各种电梯的工作，等等。

工程机械的作业工况对工程机械的技术发展提出了性能要求，包括：

(1) 低排放：大部分工程机械作为内燃机产品，由于其排放密度大，排放指标又劣于汽车，因此对环境的污染更为严重，其排放污染问题是未来一段时间内迫切需要解决的问题。面对越来越严格的排放标准，各主机厂商需不断提高产品的排放性能。

(2) 低噪声：放眼全球市场，多个国家和地区先后出台了噪声市场准入法规，如欧盟的 CE、美国的 UL、俄罗斯的 GOST 认证等。欧盟 CE 认证规定土方机械司机位置耳旁噪声限值为 80 dB（分贝），我国的噪声限值也在向此标准看齐。目前，国际先进水平已经可以将司



机耳旁噪声降至 69 dB (分贝)。

(3) 高能效: 如今, 世界各国尤其是发达国家对资源的利用效率越来越重视, 工程机械绿色化发展、能源高效利用也已成为行业的共识。因此, 低能耗产品势必将有强大的市场竞争力。工程机械节能技术的发展重点有几大方向: 基于智能控制的系统节能技术、混合动力技术、清洁能源技术以及新型传动技术等。

(4) 智能化: 以数字化、网络化、智能化制造为标志的新一轮科技革命和产业变革正孕育兴起, 美国提出的“再工业化”、德国的“工业 4.0”以及我国的《中国制造 2025》等战略, 核心都是以智能制造作为制造业的生产新模式。

目前, 工程机械产品采用的智能技术包括有线、无线遥控技术, 车身稳定系统, 智能化控制面板, 基于 GPS 定位技术的远程监控、远程诊断、集群调度管理系统, 以及自动作业系统等。

(5) 信息化: 未来工程机械产品将从局部自动化过渡到全面自动化, 并且向着远距离操纵和无人驾驶的趋势发展。随着工程机械制造业“两化”融合程度的进一步加深, 物联网与“互联网+”技术的应用, 工程机械产品技术将不断向智能化、信息化方向发展。

(6) “以人为本”的设计: “以人为本”的设计思想关键在于注重机器与人的相互协调, 提高人机安全性、驾驶舒适性, 方便司机操作和技术保养, 这样既改善了司机的工作条件, 又提高了生产效率。工程机械产品的外观造型、驾驶室内部舒适性及操纵系统正逐渐向汽车行业靠近, 以最大限度地满足驾驶人员的人性化要求。未来电子技术工程机械上的应用, 将大大简化司机的操作程序和提高机器的技术性能, 从而真正实现“人机交互”效应。

1.3 工程机械液压控制系统概述

工程车辆是具有专门用途的施工装置。具有轮式行走装置的自行

式工程车辆转场机动灵活，在工程建设、建筑施工和路桥施工等土木工程中发挥着巨大的作用。

传统的工程车辆的行走装置采用机械式传动或液力机械式传动。机械式传动方式具有传动效率高、传动精度高等优点，但换挡和调速不方便，难以实现智能控制。液力机械传动方式是在机械传动方式的基础上引入了液力变矩器，液力变矩器具有传动比与负载自适应、传动柔和等优点，但液力变矩器的高效率区域非常狭窄，低速稳定性差，对于行驶速度较低及需要频繁启动、制动和换向的工程车辆来讲，总传动效率低，造成系统发热大、可操作性差，驾驶员劳动强度高。

静液压传动具有微动性好，速度刚度大，传动效率高，易于进行启动、制动、换向操作，且易于实现电液复合控制的优点。近几年，随着液压工业的发展，液压原件的可靠性不断提高，成本不断降低，国内外相继出现了全液压驱动的工程机械，如全液压推土机、全液压平地机、全液压叉车、全液压起重机和全液压挖掘机等。

静液压驱动技术的优点是相对于机械传动和液力机械传动而言的，液压传动的优点集中于动力传动方面，而在智能控制方面，电子控制方式具有成本低、控制性能好、易于调节等优点。

在工程车辆实现全液压化以后，如何引入电子控制方式，使液压传动与电子控制相结合，充分发挥液压和电子的优点，实现工程车辆行走驱动的智能化，这是当前和今后一段时期内国内外工程车辆的发展趋势。

目前，工程车辆行走驱动系统的传动方式包括机械传动、液力机械传动、液压传动和电机驱动等方式，每种传动方式都具有各自的优缺点。

机械传动是指发动机的动力经过离合器、变速箱、万向节、传动轴、驱动桥、轮边减速器最终驱动车轮转动，使整车行驶的传动方式，由于只需克服运动幅的摩擦阻力，其速度损失很小，所以具有传动效率高、传动精度高、传动可靠等优点。但速度调节主要依靠变速箱换挡，调速惯性很大，响应速度不高，如果由驾驶员操作变速箱换挡，



则很难掌握最佳换挡时间，同时增加了驾驶员的劳动强度；如果采用智能换挡变速箱，成本大幅增加。由于以上缺点，目前工程车辆很少采用单纯的机械传动方式。

液力机械传动是在机械传动方式的基础上增加了液力变矩器。液力变矩器是一种靠液力的动量传递动力的变速装置。液力变矩器的输出转速能够对负载转矩自适应，当外负载增加时，输出转矩自动增加，输出转速自动降低，即液力变速器的传动比是随负载的变化而变化的，所以液力机械传动方式改善了驱动系统的操作性能，降低了驾驶员的操作强度，使车辆在起步、加速、制动等过程中更加柔和可控，这种性能对于频繁起步、停车、加速、制动的工程车辆具有重大意义。液力机械传动的缺点是速度刚度小、传动效率低。由于液力变矩器的扭矩自适应特性，当外部负载增加时，车辆速度自动降低，这在某些要求恒速行走的工程机械上是不允许的。另外，液力变矩器的高效率区域非常窄，在大部分的转速范围内效率都很低，这对于频繁起步、加速、制动的工程车辆是个大问题。而汽车、轿车等高速车辆的启动、制动时间占总行驶时间的比例很小，所以液力变矩器的效率对能耗的影响不大，液力变矩器因此在高速车辆上得到了广泛应用并具有很大的优势。

液压传动是近几年才广泛应用的一种传动方式，发动机的功率经过液压泵、液压阀、液压电动机最终驱动车轮行驶。液压传动按系统形式分为开式系统和闭式系统。开式系统由单向液压泵、主控制阀和双向液压电动机组成，液压油经过液压泵、主控制阀、液压电动机做功后回到液压油箱，其具有速度调节性好、散热性好等优点。闭式系统由双向液压泵、双向液压电动机和辅助液压阀组成，液压油经过液压泵、液压电动机做功后再次进入液压泵，其具有压力高、结构紧凑、传动平稳等优点。

液压传动与机械传动、液力机械传动相比，具有布置灵活、可操作性好、便于实现智能控制等优点。近几年来，随着液压技术的