



重大工程施工技术
专著系列

卞永明
刘广军
著

桥梁结构 现代施工技术

MODERN CONSTRUCTION
TECHNOLOGY OF
BRIDGE STRUCTURES



上海科学技术出版社

重大工程施工技术专著系列

桥梁结构现代施工技术

卞永明 刘广军 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构现代施工技术 / 卞永明, 刘广军著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2017.6
(重大工程施工技术专著系列)
ISBN 978-7-5478-3414-5

I. ①桥… II. ①卞… ②刘… III. ①桥梁结构—桥梁施工—研究 IV. ①U443②U445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 040897 号

桥梁结构现代施工技术

卞永明 刘广军 著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

浙江新华印刷技术有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17 插页 4
字数 400 千字

2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-3414-5/TU·243

定价: 98.00 元



本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书分别介绍了液压同步提升技术、步履式顶推技术和高铁提运架技术等三种现代桥梁结构施工技术的发展概况、装备设计、工作原理和关键技术,并给出了大量工程应用实例。第1章概述了桥梁施工技术的发展情况,第2章论述了液压同步提升技术,第3章介绍了液压同步提升技术的工程应用实例,第4章为步履式顶推技术,第5章介绍了步履式顶推技术的工程应用实例,第6章论述了高铁提运架技术与装备。

本书理论与实践相结合,内容丰富,结构体系清晰。书中所涉及的许多大型桥梁结构施工项目的案例资料未曾公开过,具有较高的参考价值。本书可以为从事机械、土木和桥梁等专业的工程技术人员提供参考,也可供高校相关专业师生参阅。

前言

随着经济与科技的飞速发展,桥梁施工的基础理论知识与施工经验不断丰富,桥梁结构现代施工技术获得了很大的提升,桥梁施工建设迎来了成熟的高科技施工时代。

当前,桥梁结构不断推出新形式,工程规模也越来越庞大,对桥梁结构的施工工艺、施工装备与施工组织管理等方面提出了更高的要求。在发展基础理论研究和总结工程实践经验的基础上,我国的桥梁结构施工技术不断推出新方法、新工艺和新装备,并在国内外桥梁工程建设中取得了良好的应用效果,提高了桥梁结构施工安全和施工进度。采用先进的桥梁结构施工工艺必须以先进的施工装备为前提,我国的桥梁结构施工装备技术也在不断更新和发展。近年来,液压同步提升装备、大节段吊装装备、步履式顶推装备、高铁提运架装备等现代施工装备相继获得了广泛应用,在各种形式的桥梁结构施工中表现出高效、高可靠性和高安全性的特点,提升了桥梁结构施工作业的机械化和智能化水平。

但是我们也应该看到,桥梁结构施工技术研究还不能完全满足现代机械化和智能化施工要求,在一些大型桥梁结构的施工中仍然面临很多技术难题,迫切需要相关基础理论、关键技术和施工案例作为指导。基于此,本书希望能够为我国桥梁结构现代施工技术的发展抛砖引玉。本书的主要内容来源于同济大学重大工程施工技术与装备课题组近年来在桥梁结构现代施工技术方面的研究成果和应用案例,分别介绍了液压同步提升技术、步履式顶推技术和高铁提运架技术等三种桥梁结构现代施工技术的发展概况、装备结构、工作原理和关键技术等,阐述了这些技术涉及的数学建模、设计计算、系统仿真、力学分析等基础问题,并结合相应技术的工程应用实例进行了深入分析,为现代桥梁施工技术的实际应用提供了参考。

本书的撰写得到了同济大学重大工程施工技术与装备教育部工程研究中心、国家土建结构预制装配化工程技术研究中心和上海同新机电控制技术有限公司的大力支持,特别感谢秦利升、宋文杰、金晓林、郑飞、程鹏、李怀东等对本书的专业贡献,也感谢卞康丽、徐瑛、崔微微等的无私帮助;同济大学的吴冲教授对本书的撰写给予了大力支持,提供了大量有用的资料和素材,同济大学的张氢教授、李安虎教授和刘宗群高工也提供了诸多的有益建议,在此深表感谢。书中引用了作者指导的几位研究生的论文,包括硕士生谢超、敬重、包小凡等;

作者的研究生梁敖在资料收集、插图绘制等方面做了大量工作,研究生周兆程和钱鑫参与了部分资料整理工作,在此一并致以谢意。本书的研究内容先后得到国家重点研发计划(2016YFC0802906)、国家科技支撑计划(2015BAF07B00)和国家自然科学基金(51575398)等项目资助,在此表示衷心感谢。

本书可以为从事机械、土木和桥梁等专业的工程技术人员提供参考,也可供高校相关专业师生参阅。

由于作者时间和水平有限,缺点和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁结构早期施工技术概况 / 1	
1.2 桥梁结构现代施工技术概况 / 2	
第 2 章 液压同步提升技术	4
2.1 液压同步提升技术发展概况 / 4	
2.1.1 国外发展概况 / 4	
2.1.2 国内发展概况 / 4	
2.2 液压同步提升系统组成 / 5	
2.2.1 承载系统 / 6	
2.2.2 液压控制系统 / 6	
2.2.3 计算机实时控制系统 / 10	
2.2.4 传感器检测系统 / 12	
2.3 液压同步提升动作过程及控制原理 / 15	
2.3.1 液压同步提升动作过程 / 15	
2.3.2 液压同步提升控制原理 / 17	
2.4 液压同步提升系统建模与仿真 / 18	
2.4.1 基于 AMESim 的液压系统建模 / 18	
2.4.2 基于 AMESim 的液压系统仿真 / 20	
2.4.3 基于 AMESim 的液压系统故障仿真 / 22	
2.5 液压同步提升系统可靠性评价及故障树分析 / 26	
2.5.1 液压系统可靠性分析的基础理论 / 26	
2.5.2 液压系统可靠性模型及估算 / 30	
2.5.3 故障树分析法概述 / 37	
2.5.4 液压同步提升系统故障树分析 / 39	
2.5.5 提高可靠性的措施 / 44	

- 3.1 大节段吊装施工 / 48
 - 3.1.1 工程概述 / 48
 - 3.1.2 施工工艺 / 49
 - 3.1.3 施工过程结构设计 / 51
 - 3.1.4 施工过程整体拱肋的计算 / 53
 - 3.1.5 水上加载脱架施工 / 54
 - 3.1.6 工程总结 / 58
- 3.2 桥面吊机施工 / 58
 - 3.2.1 工程概述 / 58
 - 3.2.2 施工工艺 / 60
 - 3.2.3 桥面吊机的组成 / 61
 - 3.2.4 工程总结 / 62
- 3.3 主体结构竖转施工 / 63
 - 3.3.1 珍珠大桥拱肋竖转下放 / 63
 - 3.3.2 小凌河大桥主副塔竖转施工 / 68
 - 3.3.3 丫髻沙大桥竖转施工 / 73
- 3.4 主体结构平转施工 / 79
 - 3.4.1 工程概述 / 79
 - 3.4.2 平转体系构造及其施工 / 79
 - 3.4.3 平转施工工艺 / 82
 - 3.4.4 工程总结 / 83
- 3.5 竖提施工 / 83
 - 3.5.1 工程概述 / 83
 - 3.5.2 施工工艺 / 84
 - 3.5.3 竖转提升支架受力计算 / 85
 - 3.5.4 竖转提升支架稳定计算 / 87
 - 3.5.5 工程总结 / 89
- 3.6 移动模架造桥机施工 / 90
 - 3.6.1 工程概述 / 90
 - 3.6.2 施工方案 / 91
 - 3.6.3 移动模架架设节段箱梁施工方案 / 91
 - 3.6.4 移动模架造桥机提升站设计计算 / 93
 - 3.6.5 工程总结 / 99

- 3.7 拖拉滑移施工 / 99
 - 3.7.1 工程概述 / 99
 - 3.7.2 施工方案 / 100
 - 3.7.3 牵引设备及安装 / 100
 - 3.7.4 拖拉施工过程 / 101
 - 3.7.5 牵引过程控制及钢箱梁线形控制 / 102
 - 3.7.6 工程总结 / 103
- 3.8 钢围堰整体下放施工 / 103
 - 3.8.1 工程概述 / 103
 - 3.8.2 整体下放施工工艺 / 103
 - 3.8.3 控制方案及策略 / 104
 - 3.8.4 载荷跟踪试验研究 / 106
 - 3.8.5 工程总结 / 107
- 3.9 沉井基础定位施工 / 108
 - 3.9.1 工程概述 / 108
 - 3.9.2 沉井定位方案选择 / 109
 - 3.9.3 计算机控制液压同步提升技术 / 110
 - 3.9.4 沉井调位控制原理 / 112
 - 3.9.5 工程总结 / 113

第 4 章 步履式顶推技术

114

- 4.1 步履式顶推技术发展概况 / 114
- 4.2 步履式顶推装备 / 118
 - 4.2.1 步履式顶推装备的功能与系统设计原则 / 118
 - 4.2.2 步履式顶推设备工艺流程 / 118
 - 4.2.3 步履式顶推装备机械结构系统的组成和功能 / 119
 - 4.2.4 步履式顶推力学原理 / 121
 - 4.2.5 步履式顶推装备的液压系统 / 128
 - 4.2.6 步履式顶推装备的电气控制系统 / 130
 - 4.2.7 步履式顶推装备的机械系统 / 134
 - 4.2.8 步履式顶推装备的性能试验 / 139
- 4.3 变曲率桥梁整体顶推施工关键技术 / 141
 - 4.3.1 竖曲线变曲率桥梁顶推施工 / 141
 - 4.3.2 平曲线桥梁顶推施工 / 145
- 4.4 步履式顶推施工导梁 / 147

- 4.4.1 步履式顶推施工导梁概述 / 147
- 4.4.2 顶推施工中导梁对主梁内力分析 / 148
- 4.5 步履式顶推的主梁 / 151
 - 4.5.1 步履式顶推施工过程中主梁内力分析 / 151
 - 4.5.2 步履式顶推施工过程中局部接触应力分析 / 154
 - 4.5.3 步履式顶推施工阶段主梁的整体稳定分析 / 157
 - 4.5.4 有限元分析 / 163
- 4.6 顶推技术的未来发展趋势 / 171

第5章 步履式顶推技术应用

172

- 5.1 杭州九堡大桥钢结构顶推工程 / 172
 - 5.1.1 工程概述 / 172
 - 5.1.2 施工工艺 / 173
 - 5.1.3 主桥整体顶推结构分析计算及结果 / 174
 - 5.1.4 引桥顶推结构分析计算及结果 / 179
 - 5.1.5 工程总结 / 186
- 5.2 宁波东钱湖跨线桥钢箱梁顶推工程 / 186
 - 5.2.1 工程概述 / 186
 - 5.2.2 施工工艺 / 188
 - 5.2.3 钢箱梁滑移过程的仿真建模 / 188
 - 5.2.4 钢箱梁滑移过程仿真结果分析 / 188
 - 5.2.5 工程总结 / 190
- 5.3 兰州深安大桥整体顶推工程 / 191
 - 5.3.1 工程概述 / 191
 - 5.3.2 步履式顶推施工总体布置与施工工艺 / 192
 - 5.3.3 钢管桁撑结构设置及受力分析 / 193
 - 5.3.4 顶推工艺的改进方案 / 193
 - 5.3.5 全桥整体顶推 / 195
 - 5.3.6 工程总结 / 195
- 5.4 上海北水湾大桥钢结构顶推工程 / 196
 - 5.4.1 工程概述 / 196
 - 5.4.2 施工工艺 / 196
 - 5.4.3 顶推过程的仿真建模及结果分析 / 197
 - 5.4.4 顶推的关键技术 / 197
 - 5.4.5 顶推技术的优点 / 198

- 5.4.6 工程总结 / 198
- 5.5 江门东华大桥钢箱梁顶推工程 / 198
 - 5.5.1 工程概述 / 198
 - 5.5.2 施工工艺 / 199
 - 5.5.3 主桥整体计算分析 / 199
 - 5.5.4 工程总结 / 205

第 6 章 高铁提运架装备

206

- 6.1 提运架装备国内外发展概况 / 206
 - 6.1.1 国外发展概况 / 206
 - 6.1.2 国内发展概况 / 207
- 6.2 提运架装备工作过程 / 208
 - 6.2.1 提梁机提梁 / 208
 - 6.2.2 运梁车运梁 / 209
 - 6.2.3 架桥机落梁 / 210
- 6.3 提梁机 / 212
 - 6.3.1 提梁机机械结构与工作原理 / 212
 - 6.3.2 提梁机设计参数计算及结构强度验算 / 216
 - 6.3.3 提梁机液压气动系统 / 236
 - 6.3.4 提梁机控制系统 / 239
- 6.4 运梁车 / 247
 - 6.4.1 运梁车机械结构概况 / 247
 - 6.4.2 运梁车钢结构强度验算 / 248
 - 6.4.3 运梁车液压气动系统 / 255
 - 6.4.4 运梁车控制系统 / 256
- 6.5 架桥机 / 256
 - 6.5.1 架桥机总体方案 / 256
 - 6.5.2 架桥机结构组成及功能 / 257
 - 6.5.3 架桥机主要特点 / 259

1.1 桥梁结构早期施工技术概况

在我国悠久的历史中,桥梁占有重要的一页。中国古代桥梁技术曾经有过辉煌的成就,我国的古代桥梁不仅数量多,而且类型也多种多样,几乎包括了所有近代桥梁中的主要形式。

根据史料考证,在3 000多年前的周文王时代,我国就在渭河上架设过大型浮桥。整座桥把数十艘船捆绑在一起,并在船上铺设木料,靠近河岸的船则用绳索固定在两岸的木桩上。这种桥施工快速、造价低廉,且拆除和架设都很方便。汉、唐以后,浮桥的运用面已日益普遍。此外,春秋战国时期,在黄河流域已经出现用木桩和木梁或石梁修筑的多孔桩柱式桥梁。秦汉时期是我国古代桥梁的创建发展时期,这时不仅发明了人造建筑材料用砖,而且还创造了以砖石结构体系为主题的拱券结构,从而为拱桥的出现创造了先决条件。后来的桥梁在原木结构梁桥的基础上,增添了石柱、石梁、石桥面等新构件,石拱桥也因此应运而生。石梁及石拱桥的大发展,不仅减少了维修费用,延长了桥的使用时间,还提高了结构理论和施工技术的科学水平。

建于隋朝大业年间(605—618年)举世闻名的赵州桥(又称安济桥),是我国古代石拱桥建筑的杰出代表,距今已有约1 400年的历史,是当今世界上现存最早、保存最完善的古代敞肩式石拱桥,如图1-1所示。赵州桥的砌置方法新颖,施工修理方便,建筑者李春就地取材,选用附近州县所产的质地坚硬的青灰色砂石作为建桥石料,在石拱砌置方法上,均采用纵向并列方法砌筑拱圈,拱石表面凿有斜纹,并安放腰铁,



图1-1 赵州桥



图 1-2 洛阳桥

拱背设置了铁拉杆,拱顶石采用刹尖方法,这些措施完全符合拱桥受力特性,也是其能完好保存至今的重要原因。

修建于北宋时期(1053—1059年)的福建泉州洛阳桥(又称万安桥),如图 1-2 所示,素有“海内第一桥”之誉,是世界上现在尚存最长、工程也最艰巨的石梁桥。它采用筏形基础,并用牡蛎将基础加固成整体,从而解决了在海湾上建桥的最大难题——桥梁基

础,该桥将生物工程技术运用到桥梁工程实践中,体现了卓越的设计思想。建造中借助涨潮,把石块用木排运到桥墩前,利用涨潮的浮力把石块放置在石墩上。洛阳桥上的 300 多块石板 and 上万块石料,都是采用这种方法架设。洛阳桥是我国古代劳动人民在桥梁建筑历史上的又一创举。

1.2 桥梁结构现代施工技术概况

20 世纪 60 年代中期,悬臂施工的方法从钢桥施工引入到预应力混凝土桥施工以后,摆脱了建造预应力混凝土梁桥只能采用预制装配和在支架上现浇施工的单一局面,促进了预应力混凝土桥梁结构的发展,相继有预应力混凝土 T 形刚构桥、连续梁桥、斜拉桥等结构如雨后春笋般地在全国各地出现,从而使预应力混凝土桥成为我国桥梁工程的主要类型。

20 世纪 80 年代以来,随着不同结构种类桥梁的出现,我国针对桥梁的现代施工技术也获得了迅猛的发展,积累了诸多知识理论和施工经验,同时极大地提升了施工技术水平,道路桥梁施工建设迎来了成熟的施工技术时代。例如,步履式顶推技术、桥梁转体式施工技术、移动模架安装施工技术等,都已经不会再受水文、地质条件的限制,并且更重视工程结构本身受力更均衡、更可靠,以及施工完成后经济效益更好。

桥梁结构现代施工技术主要分为三种技术。第一种是基于液压整体同步提升技术,采用柔性钢绞线或刚性立柱承重、提升器集群、计算机控制液压同步提升,结合现代化施工方法,将成千上万吨的构件整体提升到预定高度安装就位。该技术的核心设备采用计算机控制,全自动完成同步升降、负载均衡、姿态校正、应力控制、过程显示和故障报警等多种功能,是集机、电、液等技术于一体的现代化先进工艺与装备。该种现代技术包含针对桥梁上部结构的大节段吊装施工方法、桥面吊机施工方法、转体施工方法、移动模架施工方法,以及针对桥梁下部结构的钢围堰整体下放与基础定位的施工技术。

第二种技术是步履式顶推技术。该项技术采用步履式顶推专用装备,集顶升、平移、横向调整于一体,实现桥梁的竖向、顺桥向、横桥向的移动或调整,从而保证成桥坡度和全桥线

型。施工过程中采用计算机控制同步顶推,避免桥墩受到集中载荷;计算机控制液压实现同步下降,避免单个顶升油缸受到偏载。该步履式顶推装备具有先进的技术,安全可靠性好,工期可控制,以及经济性好的特点。

第三种技术是提运架技术。提运架技术是指在高铁桥梁建设施工时,对预制梁的提升、运输以及安装所用到的提梁机、运梁车及架桥机三种集机、电、液一体的大型重载专用设备。在施工中,提梁机将箱梁提升并移至运梁车上,再由运梁车运输,并喂送给架桥机,最终由架桥机完成箱梁的精确安装就位。

第2章

液压同步提升技术

液压同步提升技术是一项成熟的构件提升(下降)安装施工技术。该技术采用柔性钢绞线承重、提升油缸集群、计算机控制液压同步提升原理,结合现代化施工工艺,成千上万吨的构件在地面拼装后被整体提升到预定高度安装就位。在提升过程中,不但可以控制构件的运动姿态和应力分布,还可以使构件在空中长期滞留并进行微动调节,实现空中拼接,完成人力和现有设备难以完成的施工任务,使施工过程变得既简便快捷,又安全可靠。

2.1 液压同步提升技术发展概况

2.1.1 国外发展概况

国际上著名的瑞士 VSL 国际有限公司自 20 世纪 70 年代起使用液压整体提升技术,在世界各地进行了大型构件的施工、安装。例如,Chong Ro Building(韩国首尔,3 400 t 顶部结构提升)、Philippsburg Power Station(德国,高架起重绞车移位)、Nantenbach Railway Bridge(德国,1 400 t 主弓桥提升)、Palexpo Exhibition Center(瑞士,5 300 t 屋顶结构提升)等工程,都体现了液压整体提升技术无可比拟的优越性。

瑞典的 Bygging-Uddemann 公司、意大利的 Fagioli 公司、美国的 Barnhart 等公司,也都是专业提升公司,在全球成立了分公司、办事处或制造工厂,从事提升设备的生产、项目的承包、施工、服务等多方面的工作,完成了多项大吨位构件的液压同步提升安装项目。例如,法国巴黎 TDF 塔 7 780 t 塔楼的提升、芬兰赫尔辛基 9 000 t 伞形水塔的提升、日本新东京国际机场 5 068 t 修理机库钢结构屋顶和跨海大桥施工等。

2.1.2 国内发展概况

国内液压同步提升技术的研究从 20 世纪 80 年代中期开始,以同济大学为主导,大致分为三个阶段。

第一阶段:液压同步提升技术的萌芽阶段。同济大学开始进行计算机电液控制技术的工程应用研究,最早应用在液压电梯的控制中,采用 MCS-48 系列单片计算机和 DYBQ-G25 型电液比例调速阀,进行电梯的信号逻辑控制和调速控制。围绕电梯加、减速段舒适性问题和门区平层问题,研究了电液比例控制系统调速特性,并针对电梯控制接触器的电磁干

根据液压同步提升系统的结构及功能,可以看出它主要由承重系统、传感检测系统、电液比例液压控制和电气控制系统组成。根据被提升对象的不同,承重系统又分为柔性钢绞线承重系统和刚性支架承重系统。采用不同的承重系统其液压提升油缸的结构不同,但其

提升原理是一致的。故在以下的提升系统分析中,只就采用柔性钢绞线的承重系统进行分析,其结论也适用于刚性支架承重系统。

2.2.1 承载系统

由于提升结构具有大吨位、超高空的施工要求,就使得承重系统不但要有足够大的承载能力,而且要有足够长的承重索具。为此,采用抗拉强度大、单根制作长度较长的柔性钢绞线作为承重索具;采用承载能力大、自重轻、结构紧凑的液压提升器作为提升机具。这样承重

系统可按一定的方式组合使用钢绞线和提升器集群,可使得承重系统的提升重量及高度不受限制。

1) 提升机具 液压提升器的结构如图 2-2 所示。它是由提升主油缸 4 和位于两端的锚具 3 和 5 构成。锚具 3 和 5 因提升器直立放置,分别简称为上锚具和下锚具。当提升器倒立放置时,上锚具和下锚具与现在所指锚具的位置正好相反。锚具由楔形夹具和一个控制夹具动作的锚具油缸组成。它们通过楔形夹具的单向自锁作用夹紧钢绞线,而松开锚具则要通过提升主油缸和锚具油缸的配合才能打开。承重系统提升力是通过提升器主油缸大腔进油产生的。工作时,钢绞线穿过上锚、活塞杆空心部分和下锚,通过锚具的切换和主油缸的伸缩来完成提升动作。

2) 承重索具 根据油缸结构及工程要求,采用美国钢结构预应力混凝土用钢绞线标准 ASTM A416-90a;级别:270KSi;公称抗拉强度:1 860 MPa;公称直径:17.8 mm;最小破断载荷:353.2 kN;1%伸长时的最小载荷:318 kN。该产品按国际标准生产,其抗拉强度、几何尺寸和表面质量都得到严格保证。单根制作长度可达千米,呈盘状。在工程中选其作为提升索具使用,有着安全、可靠的性能,承重件自身重量轻,便于安装运输,中间不必镶接,使用后仍可回收利用。但是由于钢绞线本身的制作工艺,在承重以后钢绞线产生旋转扭矩,因此在使用时要左右旋钢绞线对半搭配使用,以平衡其旋转扭矩。

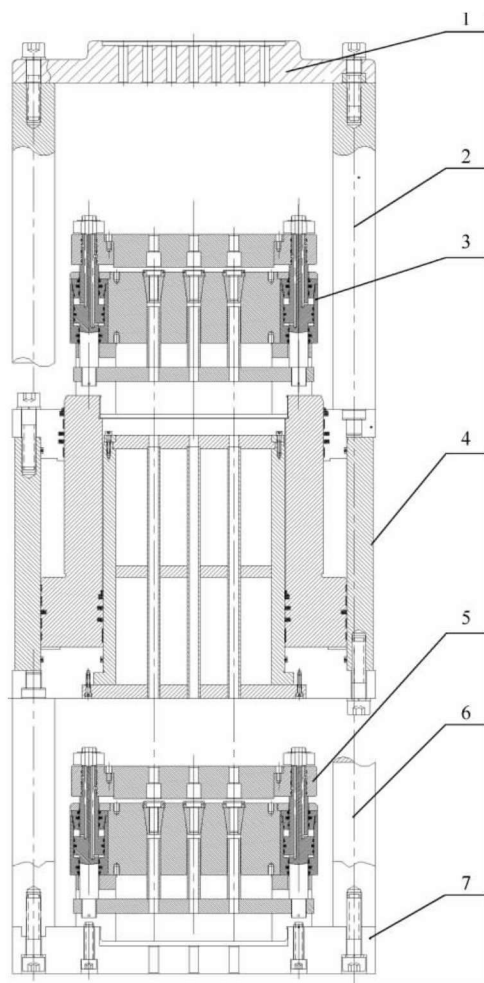


图 2-2 液压提升器结构图

1—导向板;2—上部立柱;3—上锚具组件;
4—主油缸;5—下锚具组件;6—下部立柱;7—
底板

2.2.2 液压控制系统

液压同步提升系统的工作装置都是液压驱动的,在不同的工程使用中,吊点的布置和油缸安排都不尽相同。为了提高液压提升设备的通用性、可靠性,液压系统的设计采用了模块