



重大工程施工技术
专著系列

卞永明 著

大型构件 液压同步提升技术

HYDRAULIC SYNCHRONOUS
LIFTING TECHNOLOGY FOR LARGE-SCALE
CONSTRUCTIONAL COMPONENTS

介绍系统组成、论述相关理论、突出关键技术、
近 20 项国内著名大型工程应用分析



上海科学技术出版社

重大工程施工技术专著系列

大型构件 液压同步提升技术

卞永明 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型构件液压同步提升技术 / 卞永明著. —上海:
上海科学技术出版社, 2015. 5

(重大工程施工技术专著系列)

ISBN 978-7-5478-2543-3

I. ①大… II. ①卞… III. ①液压提升机 IV.
①TH211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039168 号

大型构件液压同步提升技术

卞永明 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

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 18 插页 4

字数 400 千字

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2543-3/TH·51

定价: 86.00 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

本书详细介绍了液压同步提升技术的发展概况、应用场合、发展趋势、工作原理和装置结构等,并对液压同步提升中的关键技术(钢绞线负载均衡、电液比例阀技术、系统稳定性等)进行了深入的数学建模和仿真分析。第1章对液压同步提升技术进行概述,第2章介绍了液压同步提升系统的组成,第3章研究了钢绞线负载均衡理论,第4章介绍了液压同步提升系统比例阀技术及仿真,第5章研究了系统控制策略与参数,第6章介绍了液压同步提升系统的抗振试验,第7章详细介绍和分析了多项国内重大工程的应用实例,为液压同步提升技术的实际应用提供了宝贵的实践经验。

本书理论与实践相结合,内容系统丰富,尤其是大型工程施工项目的应用分析,较多资料未曾公开过,具有较高的参考价值。本书可以为从事机械电子工程、机械设计、机械制造、土木工程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

液压同步提升技术是一项新颖的建筑施工安装技术,它与传统的提升方法不同,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在地面拼装后,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,使大型构件的起重安装过程既简便快捷,又安全可靠。

国际上著名的瑞士 VSL 国际有限公司自 20 世纪 70 年代开始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:韩国的 3 400 t 顶部结构的提升,德国的高架起重绞车的移位和 1 400 t 主弓桥的提升,瑞士的 5 300 t 屋顶结构的提升等工程,都体现了液压整体提升技术无可比拟的优越性。此外,瑞典 Bygging - Uddemann、意大利 Fagioli、美国 Barnhart 等都是专业提升公司,它们在国外成立分公司、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,足迹遍及全球,完成了多项大吨位构件的液压同步提升安装项目,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、日本东京成田国际机场 5 068 t 修理机库钢结构屋顶和跨海大桥施工等。

在我国,从 80 年代末开始,液压同步提升技术先后应用于上海石洞口电厂和上海外高桥电厂六座 240 m 钢烟囱顶升,上海东方明珠广播电视塔 450 t 钢天线桅杆整体提升,北京西站主站房 1 800 t 钢门楼整体提升,北京首都国际机场四机位机库网架屋面提升以及上海大剧院钢屋盖整体提升等一系列重大建设工程中,获得了巨大成功,取得了显著的社会效益和经济效益。

计算机控制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,它采用柔性钢绞线承重、提升油缸集群、计算机控制、液压同步提升的原理,结合现代化施工工艺,将成千上万吨的构件在地面拼装后,整体提升(下降)到预定位置安装就位,实现大吨位、大跨度、大面积的超大型构件超高空整体同步提升(下降)。大型构件液压同步提升技术的核心是液压提升设备,它主要由柔性钢绞线或刚性支架承重系统、电液比例液压控制系统、电气控制系统及传感器检测系统组成。

液压同步提升技术是在实际工程应用迫切需要的形势下形成的,是在因工程的重大影响而要求它具备万无一失的安全可靠性和方便灵活的现场适应性前提下,得到逐步完善和不断发展的,它不仅省工、省时、省料,而且具有显著的经济效益,因而后继工程接连不断,展现了良好的应用前景。可以说,它的发展过程完全适应了经济发展需要,特别是当前建筑业发展的需要。

计算机控制液压同步提升系统由钢绞线及提升油缸集群(承重部件)、液压泵站(驱动部件)、传感检测及计算机控制(控制部件)和远程监视系统等部分组成。钢绞线及提升油缸是系统的承重部件,用来承受提升构件的重量。用户可以根据提升重量(提升载荷)的大小来配置提升油缸的数量,每个提升吊点中油缸可以并联使用。这种技术具有同步性好、被提升物件状态稳定、安全性好、效率高等优点。

本书详细介绍了液压同步提升技术的发展概况、应用场合、发展趋势、工作原理和装置结构等,并对液体同步提升中的关键技术(钢绞线负载均衡、电液比例阀技术、系统稳定性等)进行了深入的数学建模和仿真分析。最后通过对多项工程应用实例的详细介绍和分析,为液压同步提升技术的实际应用提供了宝贵的实践经验。

上海同新机电控制技术有限公司是国内知名的液压提升专业公司,专门从事机电液一体化技术研发与工程应用。本书工作得到了上海同新机电控制技术有限公司的大力支持。特别感谢郑飞、程鹏、秦利升、宋文杰、金晓林、李怀东等对本书的专业贡献,也感谢卞康丽、徐瑛等的无私帮助;本书还得到了同济大学的张氢教授、刘宗群高工、吴冲教授、刘广军副教授、秦仙蓉教授、李安虎教授等的支持;在本书的撰写过程中,同济大学的研究生蒋佳、王夏晖和沈天曜等付出了辛勤劳动。本书引用了作者早期所带的几位研究生的论文,在此一并致以感谢。本书第1章对液压同步提升技术进行概述,第2章介绍了液压同步提升系统的组成,第3章研究了钢绞线负载均衡理论,第4章介绍了液压同步提升系统比例阀技术及仿真,第5章研究了系统控制策略与参数,第6章介绍了液压同步提升系统的抗振试验,第7章介绍了液压同步提升的应用实例。全书是作者及其团队结合了多年来的科研成果和工程实践的基础上撰写而成的。本书可以为从事机械电子工程、机械设计、机械制造、土木工程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。

本人在编撰过程中虽然花了不少精力,但仍难免有错误与不足之处,殷切期盼广大读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论

1

- 1.1 液压同步提升技术特点 / 1
- 1.2 液压同步提升技术发展概况 / 2
 - 1.2.1 国外发展概况 / 2
 - 1.2.2 国内发展概况 / 3
- 1.3 液压同步提升技术的应用场合 / 4
 - 1.3.1 建筑工程 / 4
 - 1.3.2 桥梁工程 / 8
 - 1.3.3 大型机电设备 / 9
- 1.4 我国液压同步提升技术的发展趋势 / 12

第 2 章 液压同步提升系统

13

- 2.1 液压提升器与承载系统 / 13
 - 2.1.1 提升机具与承重索具 / 13
 - 2.1.2 承重系统的施工布置 / 14
 - 2.1.3 承重系统的动作过程 / 15
- 2.2 液压动力系统 / 18
 - 2.2.1 单个泵站的液压系统结构 / 18
 - 2.2.2 液压系统的扩展方式 / 20
 - 2.2.3 泵站液压系统的特点 / 20
 - 2.2.4 电液比例技术的应用 / 21
- 2.3 电气控制系统 / 27
 - 2.3.1 液压同步提升实时控制系统的原理及功能 / 27
 - 2.3.2 液压同步提升实时控制系统的结构 / 29
 - 2.3.3 液压同步提升实时控制系统中硬件设备的描述 / 31
 - 2.3.4 主控计算机的选择 / 33
 - 2.3.5 泵站电气模块 / 34
 - 2.3.6 油缸位置检测模块 / 35

- 2.3.7 控制系统的可靠性设计 / 35
- 2.4 传感器测量系统 / 36
 - 2.4.1 传感器选用原则 / 36
 - 2.4.2 信号测量 / 37

第3章 钢绞线负载均衡研究

39

- 3.1 钢绞线负载均衡分析与实验 / 39
 - 3.1.1 多束钢绞线锚固与力均衡 / 39
 - 3.1.2 载荷跟踪试验研究 / 40
- 3.2 钢绞线负载自动均衡原理分析 / 42
 - 3.2.1 负载在上、下锚具中的转换过程 / 43
 - 3.2.2 上、下锚具负载转换过程中钢绞线滑移的分析 / 45
 - 3.2.3 滑移引起的钢绞线负载均衡 / 46
- 3.3 四种滑移实验数据的分析 / 49
 - 3.3.1 消除预间隙的钢绞线滑移 / 49
 - 3.3.2 钢绞线与锚片齿牙痕的咬合深度引起的钢绞线滑移 / 50
 - 3.3.3 钢绞线与锚片之间的相对滑移 / 57
 - 3.3.4 锚孔变形引起的钢绞线滑移 / 58
 - 3.3.5 钢绞线滑移量的数学模型的建立 / 60
- 3.4 负载均衡过程的动态模拟 / 62
 - 3.4.1 钢绞线负载的数学模型的建立 / 62
 - 3.4.2 钢绞线负载均衡过程的动态模拟 / 63

第4章 液压同步提升系统比例阀技术及仿真

68

- 4.1 液压仿真概述 / 68
 - 4.1.1 液压系统设计的任务 / 68
 - 4.1.2 液压仿真研究的主要内容 / 68
 - 4.1.3 液压仿真技术发展概况 / 69
 - 4.1.4 液压仿真技术发展方向 / 70
 - 4.1.5 AMESim 软件介绍 / 71
- 4.2 电液比例阀的数学分析 / 72
 - 4.2.1 高速开关阀分析 / 72
 - 4.2.2 多路换向阀分析 / 78
 - 4.2.3 调速阀分析 / 80
- 4.3 电液比例阀的建模 / 82
 - 4.3.1 电液比例调速阀的建模 / 82

- 4.3.2 电液比例换向阀的建模 / 87
- 4.3.3 液压提升油缸负载的建模 / 92
- 4.4 电液比例阀的仿真分析 / 95
 - 4.4.1 电液比例调速阀的仿真分析 / 95
 - 4.4.2 电液比例换向阀的仿真分析 / 105

第5章 系统控制策略与参数研究

115

- 5.1 结构刚度对整体系统的影响 / 115
 - 5.1.1 大系统理论 / 115
 - 5.1.2 大系统理论在液压同步整体提升上的具体运用 / 118
 - 5.1.3 力学模型 / 120
 - 5.1.4 控制策略理论 / 122
 - 5.1.5 开环传递函数模型建立 / 123
 - 5.1.6 结构模型建立 / 124
 - 5.1.7 控制策略和PID控制方法 / 126
 - 5.1.8 仿真参数确定 / 132
 - 5.1.9 位置同步策略仿真 / 134
 - 5.1.10 载荷同步策略仿真 / 137
 - 5.1.11 双目标同步策略仿真 / 140
- 5.2 液压同步提升系统稳定性研究——以三峡高架门机自升过程为例 / 143
 - 5.2.1 系统稳定性问题的提出 / 143
 - 5.2.2 三峡高架门机自升过程的振荡再现 / 145
 - 5.2.3 三峡高架门机自升过程的振荡原因分析 / 154
 - 5.2.4 三峡高架门机控制算法的改进及其仿真分析 / 158
 - 5.2.5 液压同步提升台架试验 / 175

第6章 液压同步提升系统的抗振试验

190

- 6.1 液压同步提升系统简介 / 190
- 6.2 液压同步提升装置的配置 / 190
- 6.3 钢绞线液压提升装置安全性能分析与试验 / 191
 - 6.3.1 钢绞线 / 192
 - 6.3.2 锚夹片 / 195
 - 6.3.3 上、下锚具 / 197
 - 6.3.4 底锚 / 202
 - 6.3.5 提升油缸故障分析 / 203
 - 6.3.6 液压系统故障分析 / 204

- 6.3.7 通信网络 / 206
- 6.3.8 主机故障 / 207
- 6.3.9 传感器系统故障 / 207
- 6.3.10 系统误差分析 / 208
- 6.4 钢绞线液压提升装置抗振性能分析与试验 / 209
 - 6.4.1 系统振动仿真分析 / 210
 - 6.4.2 系统抗振试验 / 212

第7章 液压同步提升技术的应用实例

220

- 7.1 上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆整体提升工程 / 220
 - 7.1.1 工程概述 / 220
 - 7.1.2 负载均衡原理 / 221
 - 7.1.3 同步控制策略 / 222
 - 7.1.4 工程总结 / 224
- 7.2 广州丫髻沙大桥转体工程 / 225
 - 7.2.1 工程概述 / 225
 - 7.2.2 竖转体系构造及其施工 / 226
 - 7.2.3 平转体系构造及其施工 / 229
 - 7.2.4 合龙段结构 / 232
 - 7.2.5 竖转施工工艺 / 232
 - 7.2.6 平转施工工艺 / 233
 - 7.2.7 拱顶合龙 / 234
 - 7.2.8 工程总结 / 235
- 7.3 上海大剧院钢屋盖整体提升工程 / 235
 - 7.3.1 工程概述 / 235
 - 7.3.2 液压同步提升系统 / 236
 - 7.3.3 系统操作方式 / 238
 - 7.3.4 工程总结 / 238
- 7.4 北京首都国际机场 A380 机库钢屋盖整体提升工程 / 238
 - 7.4.1 工程概述 / 238
 - 7.4.2 施工方案的选择 / 239
 - 7.4.3 整体提升的关键技术 / 239
 - 7.4.4 工程总结 / 242
- 7.5 国家图书馆钢结构万吨整体提升工程 / 242
 - 7.5.1 工程概述 / 242
 - 7.5.2 提升施工特点、难点分析及应对措施 / 243
 - 7.5.3 提升施工总体部署 / 245

- 7.5.4 提升控制方案 / 245
- 7.5.5 核心筒结构及提升平台施工 / 245
- 7.5.6 提升施工过程 / 246
- 7.5.7 工程总结 / 247
- 7.6 广州新电视塔核心筒整体提升工程 / 247
 - 7.6.1 工程概述 / 247
 - 7.6.2 工程特点和难点 / 248
 - 7.6.3 整体提升钢平台体系 / 248
 - 7.6.4 核心筒劲性柱变形控制 / 251
 - 7.6.5 整体提升钢平台体系的拆除 / 251
 - 7.6.6 工程总结 / 251
- 7.7 景德镇白鹭大桥整体竖转提升工程 / 252
 - 7.7.1 工程概述 / 252
 - 7.7.2 计算机控制液压同步提升技术 / 253
 - 7.7.3 钢塔整体竖转施工方案 / 254
 - 7.7.4 工程总结 / 257
- 7.8 广州新光大桥主拱肋整体提升工程 / 257
 - 7.8.1 工程概述 / 257
 - 7.8.2 主拱肋整体提升施工工艺 / 258
 - 7.8.3 主拱肋整体提升施工方案 / 258
 - 7.8.4 主拱肋整体提升控制方案 / 260
 - 7.8.5 主拱肋中段整体提升 / 262
 - 7.8.6 工程总结 / 264
- 7.9 门式起重机安装工程 / 264
 - 7.9.1 工程概述 / 264
 - 7.9.2 安装施工工艺 / 265
 - 7.9.3 工程的施工案例 / 269
 - 7.9.4 工程总结 / 271

第1章 绪论

现代化的建筑物不仅向高层和超大方向发展,而且造型各异、别具一格,然而这些颇具创意的结构设计给安装施工带来了诸多难题,譬如大型构件的高空安装问题,使用传统的工艺方法存在一定的局限性,甚至难以逾越某些障碍。

液压整体同步提升技术是一项新颖的建筑施工安装技术,它与传统的提升方法不同,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在地面拼装后,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,使大型构件的起重安装过程既简便快捷,又安全可靠。

1.1 液压同步提升技术特点

液压同步提升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、操作闭锁、过程显示和故障报警等多种功能,是集机、电、液、计算机、传感器和控制理论等技术于一体的现代化先进设备。

液压同步提升技术具有以下特点:

1) 提升重量和提升高度不受限制 由于提升吊点数不限,提升器集群数不限,钢绞线长度不限,因此可将任意大小、任意重量的构件整体同步提升至任意高度;由于提升器锚具具有逆向运动自锁作用,使提升过程安全可靠,并且构件可在空中任意位置长期、可靠地锁定。

2) 自动化程度高 整套提升设备采用计算机控制,操作方便灵活,能够全自动地完成同步升降、负载均衡、姿态校正、参数显示及故障报警等多种功能;此外,手动、顺控、自动及单动、联动等多种操作方式十分适用于现场施工作业。

3) 控制模式完备 液压提升设备并不像其他起重设备那样仅仅是做简单的构件提升,而是能够根据不同的提升对象和施工要求,在提升过程中进行构件的姿态调整和(或)应力控制,乃至实现多目标复合控制,因此,特别适合于超大型构件的同步整体提升、安装。

4) 体积小、起重/自重比大 与相同起重量的其他起重设备相比,液压提升设备的体积

仅为它们的 $1/10 \sim 1/5$, 而提升重量却能够达到其自重的 50 倍甚至更多, 这就有可能进入其他起重设备无法进入的狭小空间或高空、地下等施工场合进行起重安装作业。

5) 安全可靠性好 为确保提升工程绝对安全, 万无一失, 对系统的安全可靠性做了周密考虑。采用信号冗余传感技术、控制系统电磁兼容技术、控制软件抗干扰技术以及采取误操作闭锁、液压系统爆裂自锁和楔形夹具逆向运动自锁等一系列措施, 有效地避免了事故的发生。

6) 适应性、通用性强 由于预见到该项技术应用的广泛性, 因此提升系统采用了模块化、集成化和程序化设计, 使液压系统、电气系统中的模块单元可以灵活组合, 以适应不同的施工要求; 系统结构紧凑, 适合在狭小空间作业, 也给设备本身的运输和现场安装布置带来方便; 硬件功能的软件化则只要通过更改软件就能够满足不同的提升控制目标。

液压同步提升技术的这些特点, 保证了各项重大工程的顺利进行。这种新颖的起重技术在长距离、大吨位提升方面的特点和优越性, 是传统的卷扬机钢丝绳滑轮组起重技术不能比拟的。上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆整体提升、北京西站主站房 1 800 t 钢门楼整体提升、北京首都国际机场四机位机库网架屋面提升、上海证券大厦钢天桥整体提升、上海大剧院 6 075 t 钢屋盖整体提升、东方航空公司双机位机库整体提升等一系列大型提升建设工程都采用了液压同步提升技术, 解决了一大批世界性的工程难题, 显示了液压同步提升技术的巨大提升能力和优越性能, 因而受到工程界的广泛关注, 并被住房和城乡建设部列为重点推广的建筑业施工新技术。

1.2 液压同步提升技术发展概况

1.2.1 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 年代开始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, 3 400 t 顶部结构的提升)、Philippsburg Power Station(德国, 高架起重绞车的移位)、Nantenbach Railway Bridge(德国, 1 400 t 主弓桥的提升)、Palexpo Exhibition Center(瑞士, 5 300 t 屋顶结构的提升)等工程, 都体现了液压整体提升技术无可比拟的优越性。

此外, 瑞典 Bygging - Uddemann、意大利 Fagioli、美国 Barnhart 等都是专业提升公司, 它们在国外成立分公司、办事处或制造工厂, 从事提升设备的生产, 项目的承包、施工、服务等方面的工作, 足迹遍及全球, 完成了多项大吨位构件的液压同步提升安装项目, 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、日本东京成田国际机场 5 068 t 修理机库钢结构屋顶和跨海大桥施工等。

1992 年投入使用的西班牙巴塞罗那广播电视塔(图 1-1), 全高 288 m、总重 2 600 t。该塔位于海拔 445 m 山上, 由三部分组成: 高 205 m、直径 4.5 m 混凝土基座, 38 m 长的钢桅杆和长 45 m 的顶端结构。它的建成是 VSL 公司液压整体提升技术的成功运用。

1997 年, 在法国 Wattrelos 的一个小镇, 为了改善当地的自来水供应状况, 决定修建一个容量 $3\,000\text{ m}^3$ 的水塔, 其塔顶圆锥形壳体重 2 000 t。圆锥底面直径达 38.9 m, 高度为

37.5 m。塔顶锥形壳先在地面上围绕塔体支柱浇注而成,然后采用液压同步提升技术,整体提升到顶部。总共用了不到 13 h,即完成了塔顶锥形壳体的提升,如图 1-2 所示。

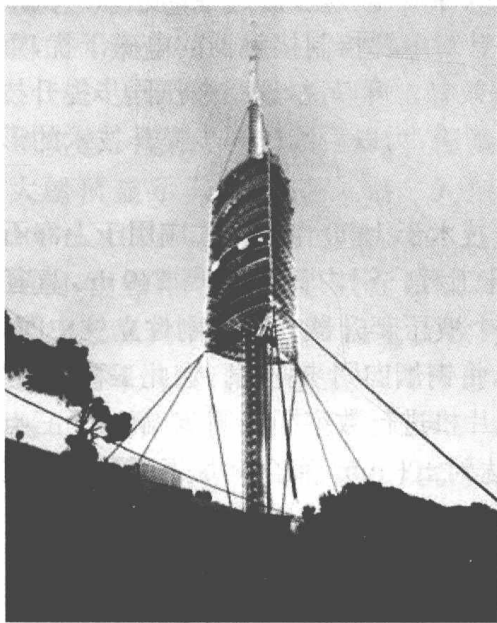


图 1-1 西班牙巴塞罗那广播电视塔

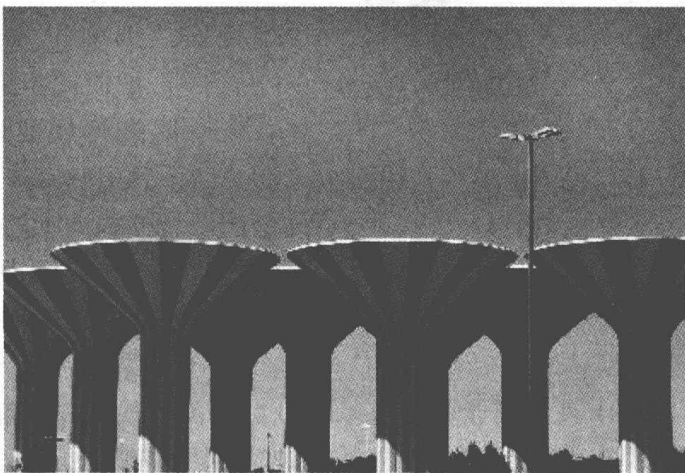


图 1-2 法国水塔

图 1-3 所示为日本东京成田国际机场修理机库。修理机库钢结构屋顶跨度为 $90\text{ m} \times 190\text{ m}$,没有内部支撑,重 5 068 t,提升高度为 18.03 m,其在地面上组装焊接完成,然后用液压同步提升的方法整体提升上去。

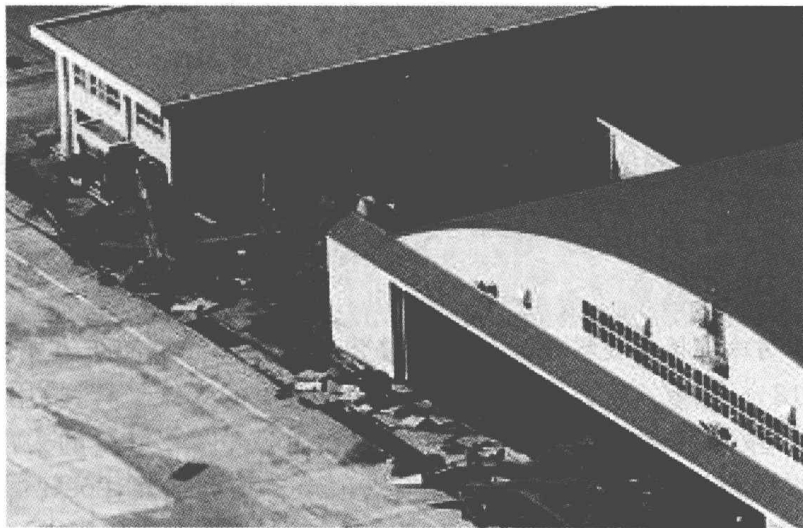


图 1-3 日本东京成田国际机场修理机库

1.2.2 国内发展概况

在国内,液压同步提升技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期,以同济大学为主导,大致分为以下三个阶段:

1) 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 系列单片机、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,进行了电液比例控制系统调速特性的研究,并针对电梯控制接触器的电磁干扰,重点解决了计算机控制系统的抗干扰问题,均取得了良好效果。可以说,这是液压同步提升技术的雏形(单点液压顶升)。对这些基本问题的研究和解决,为以后液压同步提升技术的形成奠定了技术基础。

2) 液压同步提升技术的形成阶段 液压同步提升技术于 1990 年被正式应用于上海石洞口第二电厂 2×60 MW 发电机组钢内筒烟囱顶升工程。钢内筒烟囱高 240 m,直径 6.5 m,总重 600 t,采用倒装法逐段向上顶升施工。三个液压爬升器在三根刚性立柱中间,依靠油缸的同步伸缩和上下插销的协调插拔向上爬升,将钢烟囱同步托起。在此工程中,进行了爬升器负载平稳转换研究;采用 MCS-51 系列单片机进行数字同步调节,解决了三点支承的高精度同步控制问题,使顶升过程的同步精度达到 ± 1 mm,完全满足工程要求。这是该项技术在重大工程应用方面迈出的关键一步。

3) 液压同步提升技术的成熟阶段 从 1994 年的上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆整体提升到 1996 年的上海大剧院钢屋盖整体提升,是液压同步提升技术大规模工程应用并取得辉煌成就的时期。与此同时,该项技术本身也在各项重大工程应用中不断完善,日趋成熟。在以前提升技术的基础上,提出了钢绞线承重、提升器集群、计算机控制、液压同步整体提升的方案,获得了巨大成功,取得了显著的经济效益和社会效益。工程实践证明,液压同步提升技术是一项具有良好应用前景的新技术。

1.3 液压同步提升技术的应用场合

液压同步提升技术主要应用于需要进行超大、超重、大跨度和高安装高度的构件提升领域,包括建筑工程、桥梁工程和大型机电设备等场合。

1.3.1 建筑工程

1) 上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆整体提升工程 上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆全长 118 m,总重 450 t,是当时世界上最长最重的天线桅杆,采用地面组装、整体提升的技术方案,并为此专门研制了一套提升设备。以 $\phi 15.2$ mm 的柔性钢绞线作为承重索具,120 根钢绞线从标高 350 m 的混凝土塔顶平台挂到地面,20 只 400 kN 的液压提升器分别布置在钢天线桅杆根部段四侧,托着超过 100 m 的天线桅杆,沿着 120 根钢绞线同步向上攀升。在这一工程中,柔性钢绞线的采用使电视塔天线桅杆的长距离超高空整体提升成为可能,钢绞线平均负载为每根 3.75 t;计算机控制系统采用 MCS-96 系列单片机与 FX-2 可编程控制器组成的控制网络,同时控制天线桅杆的垂直度和钢绞线的负载均衡,这一多目标控制策略保证了庞大天线桅杆的平稳提升。又由于提升器楔形夹片的逆向运动自锁作用,使提升过程十分安全可靠,锚具的主动松紧,又解决了提升器带载

下降问题。在解决了这一系列技术关键之后,钢天线桅杆经 80 余 h、350 m 的连续提升,顺利到达预定安装位置,使其顶端达到 468 m 的高度。如图 1-4 所示。



图 1-4 上海东方明珠广播电视塔

2) 上海大剧院钢屋盖整体提升工程 上海大剧院是一座国际性高等级综合剧院,凌空翱翔的大屋顶显示其迥异的风格。大屋顶平面尺寸 100 m×90 m,高 11.4 m,重 5 800 t,为一空间框架结构,由箱形和工字形截面制成 2 榀纵向主桁架,2 榀纵向次桁架,12 榀上反拱月牙形桁架和联系梁等组成;整个屋盖呈月牙形上反拱,支撑在 6 个电梯井上,如图 1-5 所示。大屋盖整体提升高度近 40 m,采用的提升设备为 44 台 4 吊点 2 000 kN 提升器。该工程进一步提高了提升设备的模块化、标准化程度,使之成为无限可扩展系统。

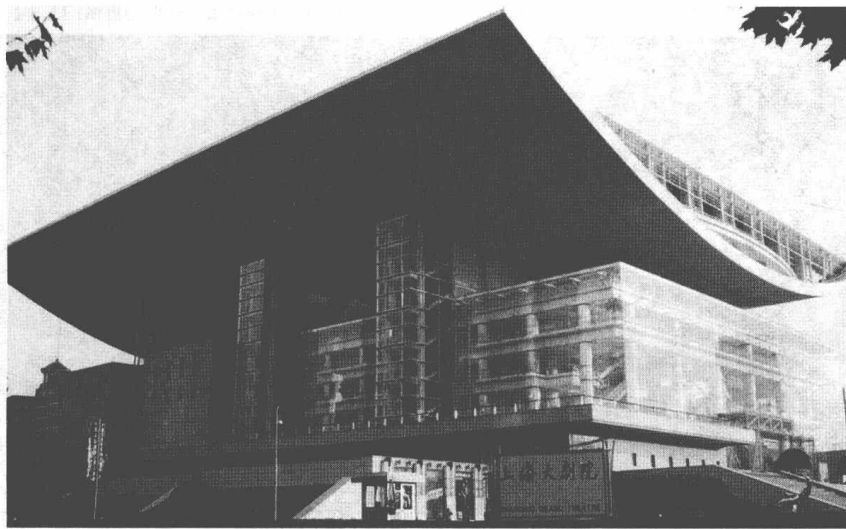


图 1-5 上海大剧院

3) 北京首都国际机场四机位机库钢屋盖分块电控液压千斤顶群同步提升、爬升工程 四机位机库屋盖钢结构由钢桥、中梁及多层球管网架三种结构组成,覆盖面积 3.5 万 m²,是我国最大的机库,并列世界第一。建筑物长 306 m、宽 90 m、高 40 m。大门处设梯形悬挑钢桥,长 306 m、宽 11.4 m、高 12 m,为双跨连续梁,重 2 100 t;中梁将结构分为对称的两部分,桁架梁长 90 m、高 12 m,重 400 t,网架为多层正交斜放抽空四角锥焊接球管网架,中间由中梁支承,长 306 m、宽 84 m、矢高 6 m,重 2 000 t。钢结构总重 5 400 t,如图 1-6 所示。巨型屋盖采用分块整体提升与爬升工艺,高空合龙技术和多级计算机主从控制方式。

4) 北京首都国际机场 A380 机库钢屋盖整体提升工程 A380 机库大厅屋盖结构跨度

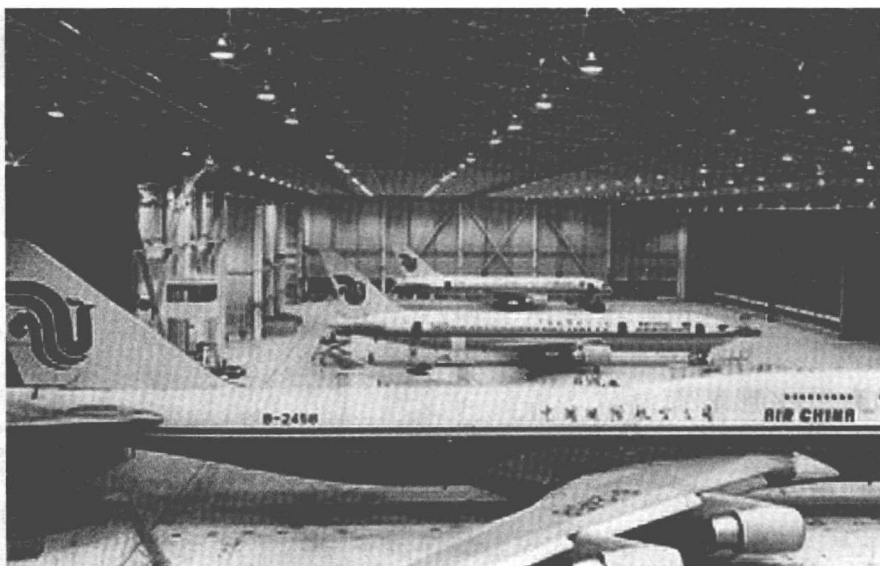


图 1-6 北京首都国际机场四机位机库

352.6 m, 进深 114.5 m, 屋盖顶标高 39.8 m。屋盖结构采用三层斜放四角锥钢网架, 下弦支承, 网格尺寸 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$, 高 8 m。机库大门处屋盖采用焊接箱形钢桁架, 宽 9.5 m、高 11.5 m, 如图 1-7 所示。

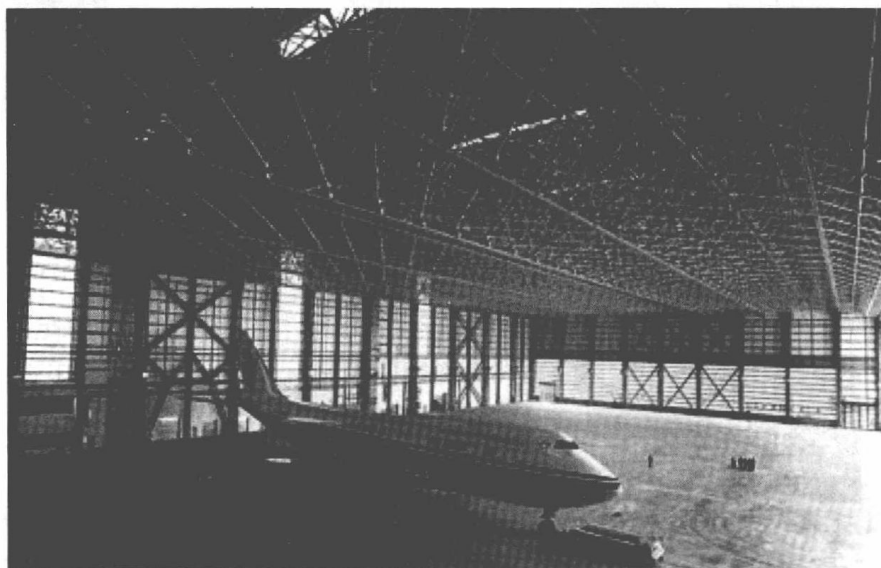


图 1-7 北京首都国际机场 A380 机库

5) 中国石油大厦主中庭钢结构索桁架整体提升工程 中国石油大厦工程所需整体提升钢结构部分为中庭屋顶, 长 43.2 m、宽 40.5 m, 由 2 榀桁架 HJ2 和 31 榀桁架 SHJ 组成。其中 HJ2 单重约 200 t, SHJ 单重约 600 t, 加上 31 根索及索头, 中庭屋面结构总重约 650 t。安装就位标高为 53.5 m, 如图 1-8 所示。针对提升重量大、安装标高较高的结构, 采用地面散拼后整体提升就位的安装方法。

6) 深圳市民中心钢结构屋盖整体提升工程 深圳市民中心钢结构屋盖为焊接球网架结构, 在安装时采用低位拼装, 两次整体提升的施工工艺。该工程具有提升结构面积大、结