

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2021.02.014

本文引用格式: 张建军, 马岷成, 赵基宏, 等. 一种超高层建筑施工整体顶升平台的液压系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49(2): 66-69.

ZHANG Jianjun, MA Mincheng, ZHAO Jihong, et al. Design of hydraulic system of integral jacking platform for super high-rise building construction [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(2): 66-69.

一种超高层建筑施工整体顶升平台的液压系统设计

张建军^{1,2}, 马岷成³, 赵基宏^{1,2}, 冀宏^{1,2}, 魏列江^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 甘肃省液压气动工程技术研究中心, 甘肃兰州 730050; 3. 甘肃第七建设集团股份有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘要: 超高层建筑的施工是以核心筒为主体进行的, 顶升钢平台模架体系在核心筒施工中得到广泛应用。顶升钢平台模架体系的动力系统为多个大功率、长行程液压缸组成的同步控制系统, 通过对顶升钢平台模架体系的工况分析, 设计一种能满足载荷和其他工况要求的液压系统。设计计算和系统分析结果表明: 该同步顶升液压系统性能稳定, 可靠性高, 安全性高。

关键词: 核心筒; 液压同步系统; 整体顶升平台; 超高层建筑

中图分类号: TH137; TU61; TU974

Design of Hydraulic System of Integral Jacking Platform for Super High-rise Building Construction

ZHANG Jianjun^{1,2}, MA Mincheng³, ZHAO Jihong^{1,2}, JI Hong^{1,2}, WEI Liejiang^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 2. Hydraulic and Pneumatic Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730050, China; 3. The No. 7 Construction Group Share Limited Company of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: The construction of super high-rise building is based on the core tube, and the jacking steel platform formwork system is widely used in core tube construction. The power system of the jacking steel platform formwork system is a synchronous control system composed of multiple high-power and long-distance hydraulic cylinders. The working conditions of the jacking steel platform formwork system were analyzed, and a hydraulic system that could meet the requirements of load and other working conditions was designed. The results of design calculation and system analysis show that the synchronous jacking hydraulic system has stable performance, high reliability and high safety.

Keywords: Core tube; Hydraulic synchronous system; Integral jacking platform; Super high-rise building

0 前言

随着建筑设计和建筑技术的巨大进步, 通过建筑业全体人员的努力, 建成了很多规模宏大、结构新颖多样、施工难度大的超高层建筑。超高层建筑的施工核心为核心筒的施工, 核心筒的建筑材料为高强度混凝土, 整体顶升平台(文中简称顶模系统)是近年来核心筒施工最常用的一种施工技术^[1]。顶模系统以多个大吨位、长行程油缸为动力, 能一次完成模架体系的顶升工作, 大大缩短施工时间, 提高施工效率^[2]。

顶模系统在国内的应用和研究有很多, 其液压控制系统多为阀控缸形式。沈阳宝能环球金融中心 T1

塔楼, 建筑高度 568 m, 地上结构 114 层, 以 14 支顶升油缸为动力, 通过液压控制阀组与电控系统实现钢平台 14 个支点同步顶升施工^[3-4]。沈阳华强 1 号楼项目, 建筑高度 313.2 m, 地上建筑 67 层, 通过电液比例阀液压控制系统控制 10 个顶升油缸, 实现连续同步顶升动作^[5]。广州珠江新城 CBD 中心地段某商务办公用超高层建筑, 总高度 530 m, 共 116 层, 采用 4 个主油缸的联动控制驱动顶模系统用于其核心筒结构施工^[6-7]。位于上海市陆家嘴金融贸易区核心地带的上海中心大厦主楼高 632 m, 地上建筑 121 层, 该建筑核心筒施工采用筒架支撑式液压动力内置整体顶

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 兰州市科技计划项目 (2018-1-27)

作者简介: 张建军 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事先进液压元件基础研究与应用。E-mail: 1916828491@qq.com。

通信作者: 马岷成, 男, 教授级高级工程师, 主要从事建筑工程施工管理方面的研究。E-mail: 2159869088@qq.com。

升钢平台模架装备,动力系统由1套集中控制系统、8台液压泵站和液压油缸组成,其中每台液压泵站带动4~5个液压顶升油缸,通过PLC控制系统实现多油缸的同步顶升过程^[8-9]。天津周大福金融中心项目位于天津市经济技术开发区内,总建筑高度530 m,塔楼层高100层,塔楼核心筒施工采用整体顶升平台,顶升支点(即顶升油缸)开始为8个,后面随着核心筒平面结构的变化减少为4个^[10]。

本文作者针对兰州市某项目要求,研制整体顶升平台液压驱动系统,达到用户的使用要求,做到高稳定性、高可靠性、高安全性。

液压系统参数要求如下:(1)顶模系统采用4个顶升油缸即主油缸,行程6 m,顶升速度5 m/h,即1.4 mm/s;(2)顶模系统工作过程中单个主油缸最大载荷为5 000 kN;(3)箱梁牛腿动作小油缸数量32个,每个主油缸的上下箱梁各4个,小油缸行程0.5 m,水平阻力40 kN,伸出速度20 mm/s;(4)整个液压系统由1个泵站供油,泵站放置在钢平台顶部,4个主油缸分布在核心筒支点位置,具体位置由建筑结构确定。

1 顶模液压系统工作过程分析

顶模系统工作示意如图1,以主油缸为动力,通过立柱连接整个钢平台,主油缸上下各有一个带有可伸缩牛腿的箱梁,牛腿的伸缩由卧式小油缸驱动。

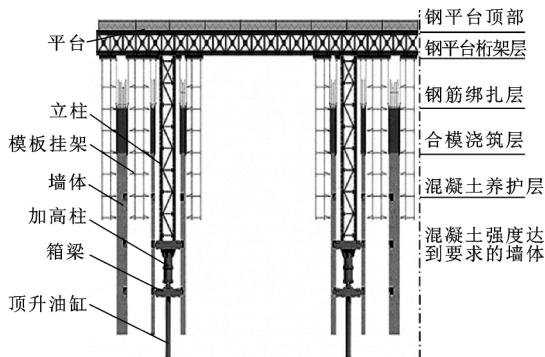


图1 顶模系统工作示意

以5 m层高为例说明顶升流程:顶升钢平台液压系统要实现对4个主油缸、32个小油缸的动作控制,完成主油缸伸出100 mm(顶升上支撑横梁腾空)→上箱梁小油缸收回(推动上箱梁牛腿收回)→主油缸继续伸出(伸出长度为1个层高,如5 000 mm)→上箱梁小油缸伸出(推动上箱梁牛腿伸出)→主油缸收回100 mm(上箱梁牛腿落实,下箱梁腾空100 mm)→下箱梁小油缸收回(推动下箱梁牛腿收回)→主油缸继续收回(提升下箱梁上升1个层高)→下箱梁小油缸伸出(推动下箱梁牛腿伸出)→主油缸伸出至主油缸无杆腔内压力达到11 MPa(下箱梁牛腿落实,并将平台的负载分配给上下箱梁共同承担)。顶升过程如图2所示。

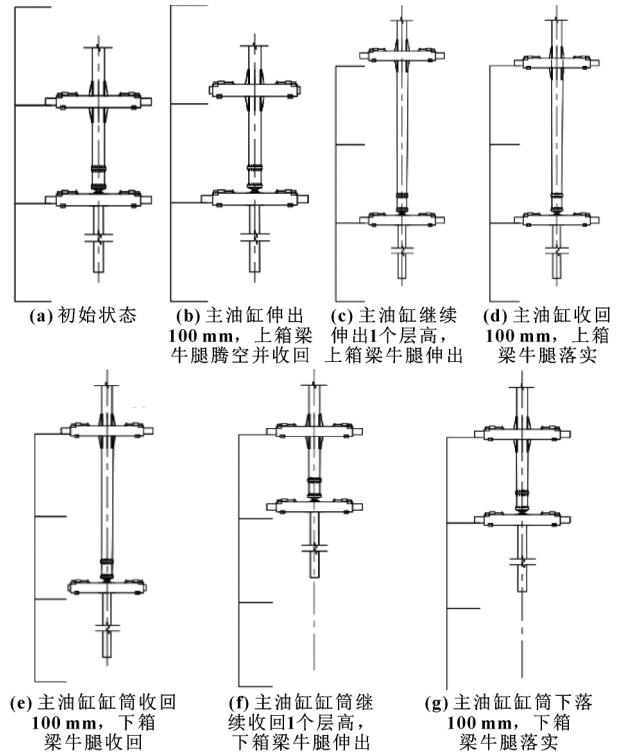


图2 顶模系统顶升流程

2 顶模液压系统设计

2.1 液压系统分析与原理图拟定

在设计该液压系统时,首先进行工况和功能分析,选定实现预定功能的液压元件类型和传动系统基本形式,再通过计算选定满足工况要求的具体元件型号和其他辅件型号^[11-15]。

(1) 功能分析与实现

由于顶模系统自重、平台上面所堆物料和风载荷等因素的影响,4个支点所承载荷并非均匀分布,存在一定的偏载,故需每个主油缸的压力可单独控制。在顶升过程中可能出现4个主油缸的速度、位移不同步的情况,故需每个主油缸的顶升速度可单独控制,即流量可调。整个系统用于超高层建筑,考虑到高空作业的局限性,冷却系统采用风冷。

液压系统工作负载为阻力负载且工作中变化小,故选用恒压变量泵作为油源,为系统提供恒定的压力,采用开式循环系统。用2个相同型号的柱塞泵作为系统的油源,一用一备。在整个顶升过程中,主油缸与小油缸不同时动作,故在主油缸到达指定位置时,通过阀控使泵为小油缸供油。

主油缸的工作压力与小油缸工作压力不同,故采用两级压力控制,通过电磁溢流阀控制主油缸工作的最高压力,低压溢流阀控制小油缸工作的低压,用两位两通换向阀进行切换。主缸油的顶升压力由恒压泵的恒压段进行控制,电磁溢流阀作为安全阀和卸荷阀,并通过远程调压阀(低压溢流阀)实现多级压

力调节，分别用于主油缸动作和小油缸动作压力。每个主油缸之间负载不均衡时，主油缸之间会产生位移差，通过调节每个主油缸的电磁比例方向阀阀口大小，调节流量和阀口节流作用，使 4 个油缸的位移差得到补偿。

针对小油缸和主油缸动作时所需流量的差异，在小油缸的电磁换向阀前加节流阀，控制进入小油缸的最大流量。

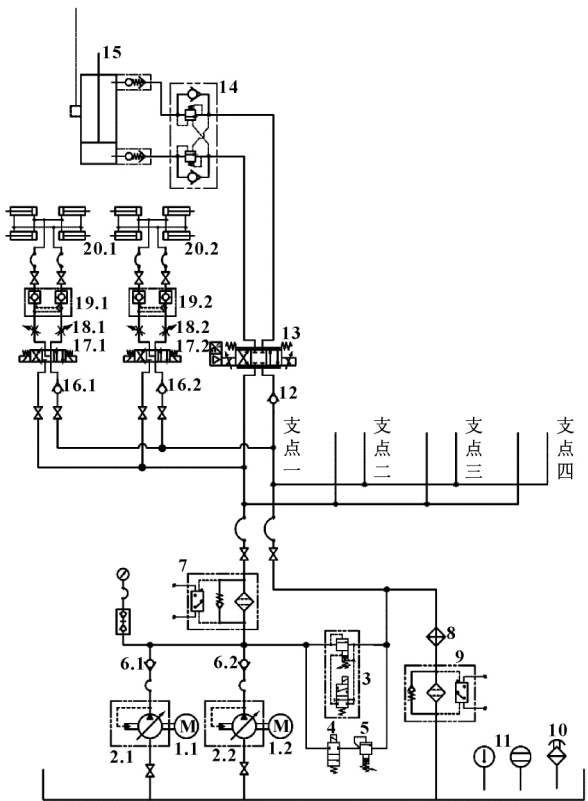
(2) 安全措施

为防止爆管等意外事故使主油缸失压，在主油缸油口上安装防爆阀。整个系统最有可能发生爆管的位置在高压管段，发生爆管时防爆阀可保证主油缸的位置保持不变，但爆管处的液压油会大量喷出，故在高压管段安装压力传感器，监测管路压力，一旦发生爆管失压便使泵站立即停止工作，减少油液浪费。

在主油缸的上下箱梁回落过程中均存在超越负载，采用平衡阀提供背压，平衡超越负载。

为提高整个液压系统的刚性，每个液压缸的控制阀组（电磁换向阀、液压锁、平衡阀、防爆阀、电磁比例换向阀等）安装在油缸油口处，再经硬管、软管连接到泵站。

液压系统原理如图 3 所示。



1—电动机 2—液压泵 3—电磁溢流阀 4、17—电磁换向阀 5—溢流阀
6、12、16—单向阀 7—高压过滤器 8—冷却器 9—回油过滤器
10—空气滤清器 11—液位液温计 13—电磁比例阀 14—平衡阀
15—主油缸 18—节流阀 19—液压锁 20—小油缸

图 3 顶升钢平台液压系统原理

2.2 确定系统压力、液压缸规格

初选系统压力：系统压力选定的是否合理，直接关系到整个系统设计的合理程度。在液压系统功率一定的情况下，若系统压力选得过低，则液压元件和辅件的尺寸和质量就会增加，系统成本也相应增加；若系统压力选得较高，则液压设备的质量、尺寸和成本会相应降低。参考《现代机械设计手册》各种机械常用的系统工作压力，取油缸无杆腔压力 $p_1 = 16 \text{ MPa}$ 。

主油缸缸载荷 $F_N = 5\,000 \text{ kN}$ ，则有：

$$A_1 = \frac{F_N}{\eta_{cm} p_1} = 328\,947.37 \text{ mm}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} = 647.3 \text{ mm}$$

式中： η_{cm} 为液压缸的机械效率，一般取 0.9~0.95； p_1 为主油缸无杆腔压力； D 为主油缸缸筒内径； A_1 为主油缸无杆腔有效面积。

活塞杆受压，为保证压杆的稳定性，设 d 为主油缸活塞杆杆径，根据“按工作压力选取 d/D ”，工作压力大于 7 MPa，取 $d/D = 0.7$ ，则 $d = 0.7 D = 453.11 \text{ mm}$ ；根据“液压缸、气缸的缸筒内径尺寸系列”和“液压缸、气缸的活塞杆外径尺寸系列”，取 $D = 650 \text{ mm}$ ， $d = 450 \text{ mm}$ ，此时，无杆腔压力为

$$p_1 = \frac{F_N}{\eta_{cm} A_1} = 15.87 \text{ MPa}$$

根据压杆稳定条件，拉压构件材料的失效判据为塑性材料满足： $\sigma_{max} = \sigma_u = \sigma_s$

许用应力与安全系数满足： $[\sigma] = \frac{\sigma_u}{n}$

式中： σ_{max} 为材料工作应力最大值； σ_u 为极限应力； σ_s 为屈服极限； $[\sigma]$ 为许用应力； n 为安全系数，一般塑性材料 $n_s = 1.2 \sim 2.5$ 。

文中活塞杆有特殊要求，则材料的性能参数：塑性材料， $\sigma_s \geq 355 \text{ MPa}$ ，取安全系数 $n_s = 5$ ，其许用应力为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s} \geq \frac{355}{5} = 71 \text{ MPa}$$

根据轴向拉压强度条件：

$$\sigma_{max} = \left| \frac{F_N}{A} \right| \leq [\sigma]$$

则 $\sigma_{max} \leq 71 \text{ MPa}$ 。

主油缸载荷 5 000 kN，则活塞杆最小截面处面积：

$$A \geq \frac{F_N}{\eta_{cm} \times 71} = 0.074 \text{ m}^2$$

活塞杆最小截面处直径：

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \geq 307 \text{ mm}$$

所以活塞杆最小截面处直径不小于 307 mm, 主油缸杆径 450 mm > 307 mm, 满足强度要求。

用同样的方法可以计算出小油缸的规格, 如表 1 所示。

表 1 油缸规格

油缸类型	载荷/kN	行程/m	缸径/mm	杆径/mm	无杆腔压力/MPa
主油缸	5 000	6	650	450	15.89
小油缸	40	0.5	80	56	8.4

2.3 流量计算

液压系统在整个工作过程中, 主油缸的同步顶升阶段流量输出最大, 且主油缸同步顶升过程为系统最主要的工作阶段, 故只要系统流量满足主油缸同步顶升阶段的流量, 即可满足系统要求。

单个主油缸所需最大流量为

$$q_{1\max} = A_1 v_1 = 27.64 \text{ L/min}$$

主油缸同步动作时所需最大流量为

$$q_{r\max} = 4q_{1\max} = 100.56 \text{ L/min}$$

2.4 液压泵规格及电动机功率计算

液压泵的輸出流量为

$$Q_{r\max} \geq K \sum q_{r\max}$$

式中: $Q_{r\max}$ 为液压泵输出流量; K 为系统泄漏系数, 一般取 1.1~1.3; $\sum q_{r\max}$ 为同时动作的液压缸的最大总流量, 对于在工作过程中用节流调速的系统, 还需加上溢流阀的最小溢流量, 一般取 $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 3 \text{ L/min}$ 。

计算得:

$$Q_{r\max} \geq K \sum q_{r\max} = 1.1(4q_{1\max} + 3) \approx 125 \text{ L/min}$$

液压泵选型原则: 为使液压泵有一定的压力储备, 所选泵的额定压力一般要比最大工作压力大 25%~60%。根据液压泵样本手册, 选择 PV 系列轴向柱塞泵 PV092L1D1SN001, 泵的最大几何排量为 $92 \text{ cm}^3/\text{r}$, 额定压力为 35 MPa, 转速为 1 500 r/min 时, 泵的流量为 138 L/min。

驱动电机功率为

$$P = \frac{p_p q_p}{\eta_p} = 41.7 \text{ kW}$$

式中: p_p 为液压泵工作压力; q_p 为液压泵最大工作流量; η_p 为液压泵总效率, 柱塞泵为 0.8~0.85。

选择 Y 系列三相异步电动机 Y250M-4-B35。

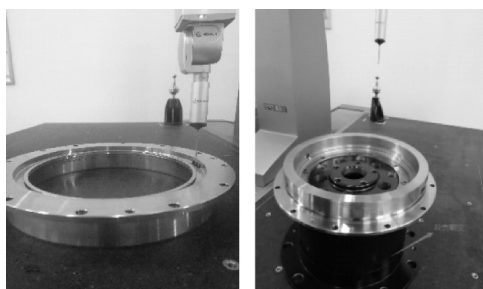
3 结论

多缸同步顶升液压系统是近年来超高层建筑施工核心筒施工使用最多的顶升动力系统, 实际的建筑高度、核心筒大小、楼层层高不同, 其顶升平台的液压系统也不尽相同。本文作者针对兰州市某超高层项目, 设

计一种顶升平台的液压系统。该系统采用比例阀控制主油缸的同步顶升动作, 加上位移传感器、压力传感器等元件, 通过电控系统实现主油缸顶升过程的闭环控制, 在满足指标参数要求的同时, 还在系统稳定性、安全性和可靠性等方面有很好的保障。

参考文献:

- [1] 曹鹏, 宗乃旭. 海外超高层项目模架体系探析 [J]. 施工技术, 2019, 48(2): 67-73.
CAO P, ZONG N X. Study on formwork system of overseas super high-rise building [J]. Construction Technology, 2019, 48(2): 67-73.
- [2] 张爱武. 超高层建筑核心筒爬升模架体系选型分析及施工工艺选择 [J]. 施工技术, 2019, 48(2): 74-78.
ZHANG A W. Type selection analysis and construction technology selection of core tube climbing formwork frame system for super high-rise buildings [J]. Construction Technology, 2019, 48(2): 74-78.
- [3] 潘春龙, 王高飞, 魏小海, 等. 建筑施工液压模架体系智能多点同步顶升技术应用 [J]. 施工技术, 2017, 46(16): 14-17.
PAN C L, WANG G F, WEI X H, et al. Application of intelligent and multi-point synchronous lifting technology of hydraulic formwork system for building construction [J]. Construction Technology, 2017, 46(16): 14-17.
- [4] 潘春龙, 全文宝, 张万实, 等. 超高层建筑施工装备集成平台技术 [J]. 施工技术, 2017, 46(16): 1-4.
PAN C L, QUAN W B, ZHANG W S, et al. Technical of the equipment integrated platform of high-rise building [J]. Construction Technology, 2017, 46(16): 1-4.
- [5] 郑志国. 顶升钢平台模架体液压控制系统的设计 [J]. 机电工程技术, 2016, 45(9): 45-47.
ZHENG Z G. Lifting body design of hydraulic control system of steel platform formwork [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2016, 45(9): 45-47.
- [6] 白雪, 马海彬, 姚传勤, 等. 超高层建筑顶升模板体系设计及模态分析 [J]. 工业建筑, 2013, 43(5): 14-17.
BAI X, MA H B, YAO C Q, et al. Design and modal analysis of jacking form system for super high-rise building [J]. Industrial Construction, 2013, 43(5): 14-17.
- [7] 金静. 超高层建筑核心筒模板体系的优化设计及应用 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012.
JIN J. The optimization and application in the formwork of core tube of super high-rise building [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2012.
- [8] 龚剑, 周虹. 上海中心大厦结构工程建造关键技术 [J]. 建筑施工, 2014, 36(2): 91-101.
GONG J, ZHOU H. Key technology for structure construction of Shanghai tower [J]. Building Construction, 2014, 36(2): 91-101.



(a) 背面检测 (b) 正面检测

图 10 三坐标检测

表 1 关键尺寸检测结果 单位: mm

关键尺寸	公差要求	实测值	偏差
内孔 $\phi 258$	0~0.15	258.071	+0.071
外圆 $\phi 376$	-0.018~0.054	375.976	-0.024
同心度 1	0.03	0.018	-
垂直度 1	0.05	0.048	-
圆柱度 1	0.016	0.015	-

5 结束语

针对机车轴承座零件结构相似、尺寸变化较多的问题,利用 ESPRIT 软件的“基于知识的加工”编程思想,通过二次开发,实现轴承座零件自动编程。通过验证实验,完成了一种轴承座零件的加工,加工过程中未发生碰撞干涉,产品尺寸满足设计要求,验证了本文作者所提出的自动编程模块的有效性。该技术可大幅缩短批量产品工艺规划的时间,有助于实现智能切削加工。

参考文献:

[1] 周建斌,黄文勇,梁政,等.铁路机车轴箱轴承安全研究[J].中国安全科学学报,2019,29(S1):63-68.
ZHOU J B ,HUANG W Y ,LIANG Z ,et al.Primary exploration on safety of railway locomotive axle-box bearings [J]. China Safety Science Journal ,2019 ,29(S1) : 63-68.

[2] 桂志红,李凤江,张谦,等.机车轮对驱动单元大型薄壁轴承座的工艺研究与应用[C]//“田心杯”轨道交通金属加工技术征文大赛论文集.株洲,2019.

[3] 迪培软件科技(上海)有限公司.ESPRIT CAM 功能介绍[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2013(6):47-49.

[4] 曹振,范利娟.基于 ESPRIT 的双通道双主轴车铣复合加工中心的加工技术分析[J].机电信息,2018(3):87-88.

[5] ESPRIT.CAM 软件初级和高级培训手册[M].顾瑞荣,译.北京:高等教育出版社,2014.

[6] 秦闯,刘战强,叶洪涛,等.基于 UG 二次开发技术的 CAD/CAE/CAM 软件集成方法研究[J].机床与液压,2015,43(9):141-144.
QIN C ,LIU Z Q ,YE H T ,et al.Research on integration methods of CAD/CAE/CAM software based on redevelopment of UG technology [J]. Machine Tool & Hydraulics , 2015 ,43(9) : 141-144.

[7] 袁带英,朱梅玉.ESPRIT 在汽轮机转子车削数控编程中的应用[J].现代制造工程,2016(12):76-83.
YUAN D Y ,ZHU M Y .Application of ESPRIT in the steam turbine rotor turning NC programming [J]. Modern Manufacturing Engineering ,2016(12) : 76-83.

(责任编辑:张楠)

(上接第 69 页)

[9] 龚剑,朱毅敏,徐磊.超高层建筑核心筒结构施工中的筒架支撑式液压爬升整体钢平台模架技术[J].建筑施工,2014,36(1):33-38.
GONG J ,ZHU Y M ,XU L .Technology for hydraulic climbing integral steel platform formwork supported by cylinder racks in super tall building's core tube structure construction [J]. Building Construction ,2014 ,36(1) : 33-38.

[10] 周洪涛,苏亚武,柯子平,等.天津周大福金融中心工程整体顶升平台设计与施工[J].施工技术,2017,46(23):24-29.
ZHOU H T ,SU Y W ,KE Z P ,et al.Design and construction of integral lifting platform for Tianjin CTF financial

center project [J]. Construction Technology ,2017 ,46 (23) : 24-29.

[11] 林建亚,何存兴.液压元件[M].北京:机械工业出版社,1988.

[12] 官忠范.液压传动系统[M].3版.北京:机械工业出版社,1996.

[13] 秦大同,谢里阳.现代机械设计手册(第4卷)[M].北京:化学工业出版社,2011.

[14] 王益群,高殿荣.液压工程师技术手册[M].北京:化学工业出版社,2010.

[15] 初长祥,马文星.工程机械液压与液力传动系统:液压卷[M].北京:化学工业出版社,2015.

(责任编辑:张楠)