

粮食筒仓液压滑模施工工艺及智能监测研究*

邢东亮¹, 刘俊伟², 尚文昌², 于志涛¹, 王德利³, 张超²

(1. 山东港口青岛港集团有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520; 3. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266000)

[摘要] 结合青岛港某港区粮食筒仓工程滑模施工, 以筒仓液压滑模施工工艺为出发点, 重点介绍本工程中滑模系统的组成系统、滑模施工工序及质量控制措施。本工程液压滑模系统由液压提升系统、模板系统和操作平台系统 3 部分组成, 采用 56 台 GYD60 滚珠式千斤顶同步顶升, 总起重量为 3 360kN, 滑模提升总重设计值为 2 275kN, 滑模系统的顶升能力可满足工程滑模施工要求; 滑模施工工艺主要分初滑、正常滑升和末升 3 个阶段, 在滑模提升架安装位移传感器, 监测滑升过程中平台的水平位移, 滑升过程中沿筒仓半径、切线方向位移均 $\leq 3\text{mm}$, 小于规范允许值, 证明滑升过程中平台处于平稳状态, 采取的防纠偏措施到位, 且能保证仓壁混凝土浇筑尺寸偏差控制在允许值内。

[关键词] 粮食筒仓; 模板; 液压滑模; 智能监测; 施工技术

[中图分类号] TU755.2 [文献标识码] A [文章编号]

Hydraulic Slipform Construction Technology and Intelligent Monitoring of Grain Cylindrical Silo

XING Dongliang¹, LIU Junwei², SHANG Wenchang², YU Zhitao¹, WANG Deli³, ZHANG Chao²
(1.SPG Qingdao Port Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China; 2.School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China; 3. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Combined with the slipform construction of a grain cylindrical silo project in a certain port area of Qingdao Port, this paper takes the hydraulic slipform construction technology of cylindrical silo as a starting point, focuses on the slipform system in this project, the composition of the system, slipform construction process and quality control measures. 56 GYD60 ball jacks are used to synchronize the lifting of the formwork. The total lifting capacity is 3 360kN, and the total weight of slide mold lifting design value is 2 275kN, the jacking capacity of the slipform system can meet the requirements of the project slipform construction. The slipform construction process is mainly divided into three stages which are initial slip, normal slip and final rise, displacement sensors are installed in the slipform lifting frame to monitor the horizontal displacement of the platform during the sliding process. The displacement along the radius and the tangential direction of the silo during the sliding process is less than 3mm, which is less than the permissible value of the specification, which proves that the platform is in a smooth state during the sliding and lifting process, and the anti-deviation measures taken are in place to ensure that the deviation of the concrete casting dimensions of the silo wall can be controlled within the permitted value.

Keywords: grain cylindrical silo; formwork; hydraulic slipform; intelligent monitoring; construction

0 引言

2015 年 3 月国家发展改革委联合国家粮食局¹

*泰山学者工程专项经费资助

(tsqn202211176)

[作者简介] 邢东亮, 高级工程师, E-mail:

xdl@qdport.com

[通信作者] 刘俊伟, 教授, 博士生导师, E-mail:

liujunwei@qut.edu.cn

[收稿日期] 2024-03-04

与财政部共同印发《粮食收储供应安全保障工程建设规划(2015—2020 年)》, 明确提出实施“粮安工程”, 加强粮食仓储物流设施建设, 切实保障国家粮食储藏安全^[1]。港口工程是我国沿海地区经济发展的重要基石^[2-5], 粮食筒仓作为港口工程重要组成部分^[6-7], 保证施工质量、有效防范安全事故是保障国家粮储安全的重要途径。滑模施工具有节省操作空间、降低模板消耗、施工效率高、缩短施工工期、成本低等优点^[8], 广泛应用于筒仓

工程，滑模施工主要借助动力提升系统实现模板沿筒仓仓壁滑升^[9]。施工过程中滑模会出现水平、垂直偏差，影响筒仓施工质量^[10]，论证滑模施工工艺重难点对保障筒仓滑模施工质量与安全至关重要。

1 工程概况

青岛港某港区粮食筒仓工程如图 1 所示，拟建 16 座钢筋混凝土粮食筒仓（A5/6-1~8），呈 2×8 排列，单仓容量 1 万 t。粮食筒仓内径 25m、壁厚 350mm，单仓建筑面积 518.75m²。基础采用钻孔灌注桩，其承台顶标高为 5.500m，筒壁标高为 5.500~12.450m，仓壁标高为 12.450~42.000m，仓顶标高为 42.000~47.100m，仓顶为钢结构屋架与钢筋混凝土屋面板组成的锥壳结构，屋面板厚 175mm。室内±0.00 绝对标高为 6.300m，室外地面标高为 6.200m，筒仓檐口标高为 43.100m，筒仓顶标高为 47.100m。建筑物设计使用年限 50 年，抗震设防烈度 7 度。

根据施工工艺划分，筒仓上部结构分为筒壁、仓壁 2 部分，如图 2 所示，筒壁部分采用传统木模板加满堂支架工艺进行施工，仓壁部分采用滑模工艺进行施工。本工程粮食直径大、数量多、高度较高，仓壁部分采用滑模施工工艺，专业性强，工作量大，机械设备、建筑材料水平运输、垂直运输难度较大，涉及滑模等危险较大大部分项施工，现场质量要求高、安全管理难度大，如何保障滑模施工质量及安全是筒仓工程施工重点^[11-12]。



图 1 粮食筒仓平面布置

Fig.1 Plan layout of grain cylindrical silo

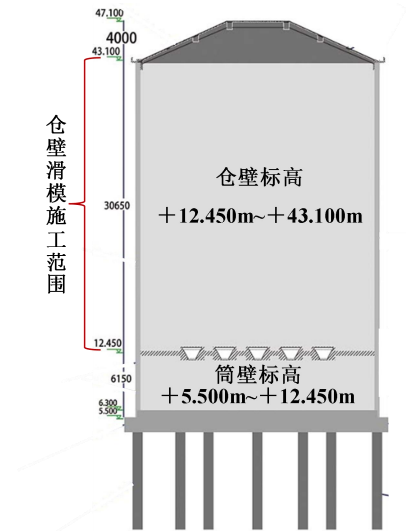


图 2 仓壁滑模施工范围

Fig.2 Construction scope of slipform on silo walls

2 筒仓滑模施工工艺

本工程仓壁（12.450~42.000m）采用滑模施工工艺，滑模施工范围如图 2 所示，自下环梁上表面（12.450m）至上环梁下表面（43.100m），滑升总高度为 30.650m，仓壁竖向钢筋为 $\phi 14\sim\phi 18$ （HRB400），水平环筋为 $\phi 14\sim\phi 32$ （HRB400），间距为 90~150mm。

2.1 滑模系统

滑模施工系统是由液压提升系统、模板系统和操作平台系统 3 部分组成^[13]，如图 3 所示。液压提升系统由液压控制台、千斤顶、支撑杆、输油管路等设备组成，模板系统由模板、围圈和提升架组成，施工操作平台系统分为施工操作平台、内外悬挂脚手架、封闭围护结构 3 部分。

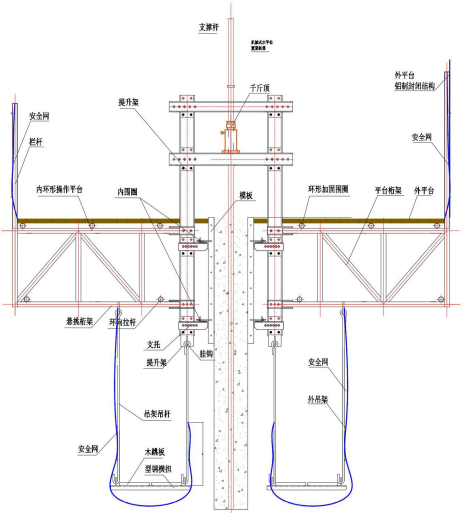


图 3 滑模施工系统

Fig.3 Slipform construction system

2.1.1 液压提升系统

液压提升系统包括液压控制装置、输油及调节设备及提升设备 3 大部分^[14],

液压控制装置为 YKT-56 型液压控制台,输油及调节设备包括电磁换向阀、分油器、针阀和输油管路,提升设备主要包括支撑杆、GYD60 型液压千斤顶(额定工作压力 8MPa,工作起重量 30kN,最大起重量 60kN,油缸容积 0.35L,行程 20~30mm,外形尺寸 160mm×160mm×420mm,质量 23.5kg,适用支撑杆为 $\phi 48 \times 3.0$ 钢管,安装尺寸为 4 $\phi 17 @ 120 \text{mm} \times 120 \text{mm}$)、油管、分油器、液压控制装置、油液和阀门等。

提升时,通过控制台进行液压指令输入,使高压油液通过输油设备进入液压千斤顶,使其在油压作用下带动滑模及操作平台沿着支撑杆向上爬升,爬升到指定高度后,再次通过控制台控制调节设备换向回油,油液由千斤顶内排出并回入油泵油箱,通过重复以上步骤,达到液压千斤顶带动滑模和操作平台上升的目的。

支撑杆采用 $\phi 48 \times 3.0$ 钢管,须免漆调直。支撑杆的连接采用扣压机缩径后扣接,将支撑杆的上下段加工成承插口段,施工中随滑模平台升高,后续段陆续插接在一起,点焊加固连接。每个接口点焊至少 3 点,防止顶升时千斤顶夹起提升杆。在滑升过程中遇到支撑杆在混凝土内部发生弯曲时,应停止使用该处千斤顶,将支撑杆弯曲处的混凝土清除,根据支撑杆弯曲情况采取不同应对措施:若弯曲程度没有超过安全规范,可采用钩头螺栓加固;若支撑杆严重变形,必须将弯曲部分全部切割,然后采用钢筋绑条在切割处进行焊接,保证支撑杆牢固可靠。

2.1.2 模板系统

模板系统由模板、围圈和提升架 3 部分组成,如图 3 所示。浇筑时模板与围圈将会承受浇筑混凝土产生的侧压力,提升时模板与混凝土间的摩擦力将会通过围圈传递给提升架。

本系统采用定制的钢模板,选用的模板宽度为 100~300mm,高度为 1 200mm,此高度为根据混凝土出模强度所需时间和模板滑升速度($H=TV$)进行验算得出:本工程混凝土出模强度要求时间为 8h,模板滑升速度为 150mm/h,因此模板高度 $H=1.2\text{m}$ 。

本工程采用 600mm×1 200mm, 300mm×1

200mm, 200mm×1 200mm, 100mm×1 200mm 等组合模板,部分筒仓外模采用 6 000mm×1 250mm×3mm 花纹钢模板。模板连接及固定采用螺栓、回形卡和 8 号铁丝捆绑。充分发挥围圈固定模板,传递施工水平、垂直荷载并防止模板侧向变形的功能。本工程 A5/6-1~4(施工 1 区)围圈采用 [8, A5/6-5~8(施工 2 区)围圈采用 L 75×8,接头搭接焊。

2.1.3 操作平台系统

施工操作平台是滑模施工的操作场地,筒仓内外操作平台采用悬挑桁架式平台(见图 4),与提升架通过 M16 螺栓机械连接,外挑尺寸为 1.70m,铺板为木制平板,整个模板组合内外部边缘完全覆盖,同时为了方便施工,平台设置连续的护栏及跳板,如图 5 所示。

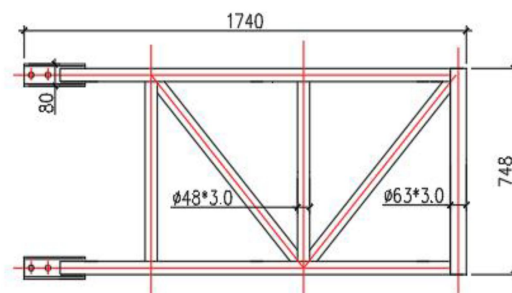


图 4 悬挑桁架式平台

Fig.4 Overhanging truss-type platform

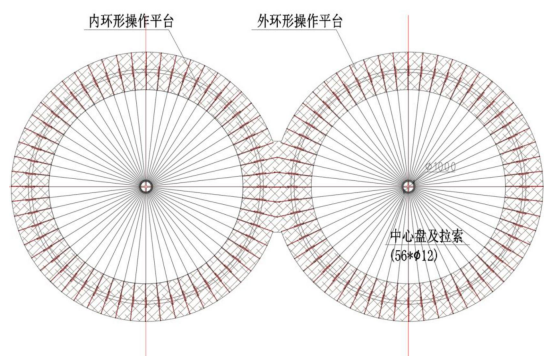


图 5 操作平台俯视图

Fig.5 Top view of the operating platform

2.1.4 滑模施工荷载计算

滑模施工荷载主要考虑操作平台自重 G_{1k} 、模板自重 G_{2k} 、提升架与千斤顶自重 G_{3k} 、施工活荷载 Q_{1k} 、模板与混凝土摩阻力 Q_{2k} 。荷载取值参照 GB/T 50113—2019《滑动模板工程技术标准》第 5.1 条规定。

1)操作平台内圈与外圈面积 $S_1=300.24\text{m}^2$, 吊

脚手架内圈与外圈面积 $S_2=95.57\text{m}^2$ ，平台板自重标准值取 0.35kN/m^2 ，平台自重为：

$$G_{1k}=0.35(S_1+S_2)=138.53\text{kN} \quad (1)$$

2)模板高度 1.2m，钢模板自重标准值取 0.40kN/m^2 ，筒仓内径 25m、外径 25.7m，模板自重为：

$$G_{2k}=0.40 \times \pi \times (25+25.7) \times 1.2=76.45\text{kN} \quad (2)$$

3)开字架质量为 195kg/只，千斤顶质量为 20kg/台，间距为 1.4m，根据设计共需 56 只提升架，提升架与千斤顶自重为：

$$G_{3k}=(0.195+0.02) \times 56 \times 9.8=118.0\text{kN} \quad (3)$$

4)平台施工活荷载标准值取 2.5kN/m^2 （含人工、材料、机械），施工活荷载为：

$$Q_{1k}=2.5 \times (300.24+95.57)=989.53\text{kN} \quad (4)$$

5)模板与混凝土摩阻力标准值取 2.0kN/m^2 ，模板与混凝土摩阻力为：

$$Q_{2k}=2.0 \times (25+25.7) \times \pi \times 1.2=349.97\text{kN} \quad (5)$$

根据《滑动模板工程技术标准》第 5.16 条，滑模提升总重设计值为：

$$P=1.2(G_{1k}+G_{2k}+G_{3k})+1.4(Q_{1k}+Q_{2k})=2\,275\text{kN}$$

单台千斤顶最大工作起重量为 60kN，56 台千斤顶总起重量为 3 360kN，由于 $2\,275\text{kN} < 3\,360\text{kN}$ ，故本工程滑模系统的提升能力可满足滑模施工要求。

2.2 滑模滑升施工工艺流程

滑模施工工艺主要分初滑、正常滑升和末升 3 个阶段^[15]，滑升施工工艺流程如图 6 所示。进入正常滑升后如遇停水、停电、6 级以上风力及其他意外情况，采取停滑措施。

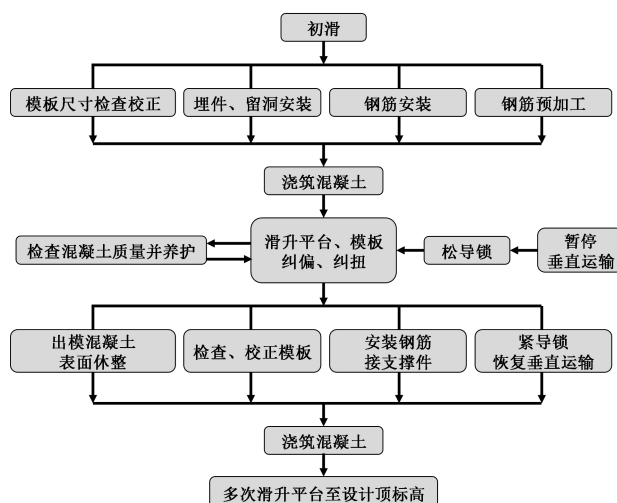


图 6 滑升施工工艺流程

Fig.6 Sliding construction process

2.2.1 滑模初滑

滑升前，应当首先进行试滑升。试滑升时，全部千斤顶必须同时上升 5~10cm 高度，准确判断混凝土出模强度，符合施工要求后，再将模板向上滑升 200mm。然后全面检查模板系统的可靠性，同时能确定混凝土脱模强度在 0.2~0.4MPa 时，再进入正常滑升阶段。

筒仓仓壁混凝土分 4 层正、反向浇筑高度为 1 200mm，混凝土入模时间控制在 2h 内。浇筑完成并养护 3~6h 后才能开始试提升模板，可提升 2~4 个行程。初次滑升模板，模板内混凝土浇筑高度一般在约 1 200mm，第 1 层浇筑的混凝土强度应符合 0.2~0.4MPa 的规定。

2.2.2 正常滑升

初滑完成后，根据滑升计划按施工流水段计划进行分层浇筑、分层滑升。正常滑升时，2 次滑升的时间间隔必须控制在 2h 内，且此时的混凝土出模强度须在 0.2~0.4MPa，滑升过程中操作平台应保持水平，每个浇筑层的控制浇筑高度为 300mm，千斤顶的相对高差 ≤ 50mm，相邻 2 台千斤顶的升差 ≤ 25mm。若超过允许值，应及时检查各系统的工作情况及混凝土出模强度，采取措施及时调整高差。

2.2.3 末升

模板滑升临近顶标高（43.100m）前，应逐步放慢滑升速度，同步开展抄平、找正工作。一定要在滑升至距顶标高最后一模前抄平和找正工作成功结束。保证筒仓顶部均匀交圈，确保顶部标高和顶部位置的准确要求。混凝土浇筑彻底完成后，立即解除模板平台上的活荷载。

3 筒仓滑模施工纠偏措施及智能监测

3.1 纠偏措施

在模板滑升前用水准仪对整个平台及千斤顶的高程进行测量校平，为保证平台滑升期间平台结构保持竖直，在支撑杆上每隔 30cm 进行划线、抄平，安装限位器并严格按支撑杆上的水平线控制整个平台水平上升。

为防止由于出模混凝土强度与摩阻力差异大而导致平台滑升期间受力不均匀，混凝土应按 30cm 分层交圈闭合浇筑；同时，为避免模板长期受同一方向的力而发生扭转，各分层混凝土应按顺时针、逆时针变换循环浇筑。

3.2 智能监测

平台初始标高为 12.450m。为防止平台在滑升过程中出现偏差影响仓壁施工质量，保证平台整体均匀稳定滑升，在筒仓操作平台提升架顶梁上安装 3 枚位移传感器（JD1, JD2, JD3, 间隔 120° 安装），位移传感器通过数据线连接到滑模智能检测系统，通过 5G 技术将监测数据实时上传至后台，实现滑模智能监测，实时监测滑升过程中提升架的水平位移。传感器安装平面如图 7 所示，滑模智能监测系统如图 8 所示。

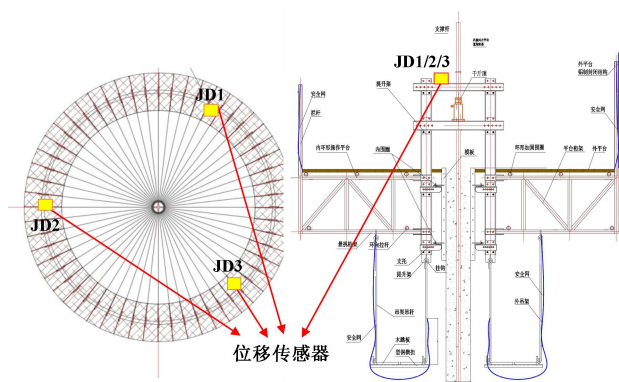


图 7 滑模智能监测系统安装平面

Fig.7 Installation plan of slipform intelligent monitoring system

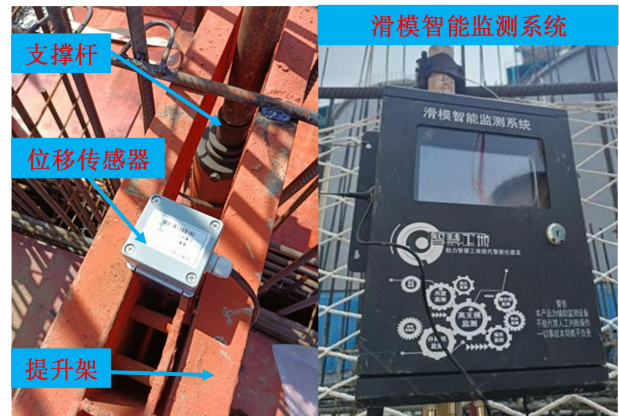
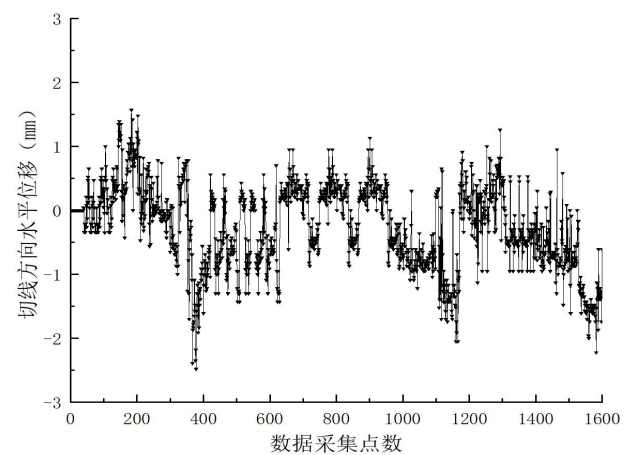


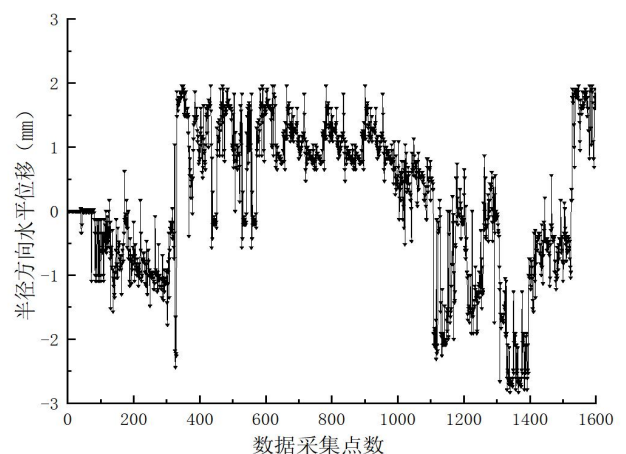
图 8 滑模智能监测系统

Fig.8 Slipform intelligent monitoring system

JD1~JD3 随滑模滑升过程（数据采集点）中数据变化曲线如图 9~11 所示。由图可知，滑升过程中沿筒仓半径、切线方向位移均 $<3\text{mm}$ ，小于规范允许值，证明滑升过程平台处于平稳状态，防纠偏措施到位，且能保证仓壁混凝土浇筑尺寸偏差控制在允许值内。滑升过程中半径方向水平位移与切线方向位移不断变化，呈周期性波动比较明显，主要是因为滑升过程中施工活动及风荷载影响。



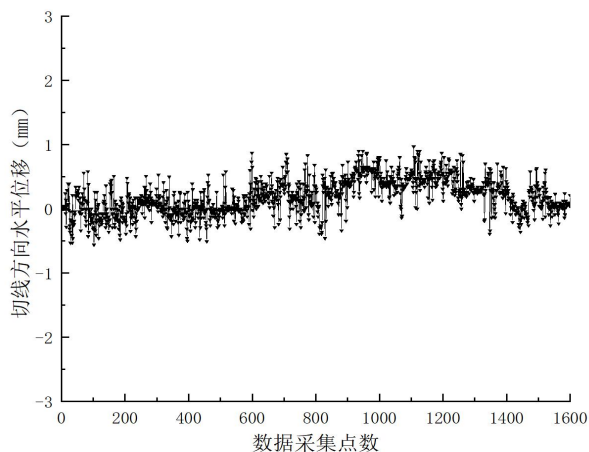
a 沿筒仓半径方向



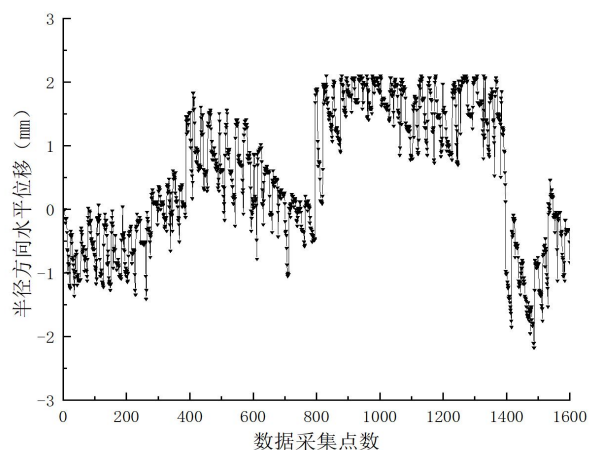
b 沿筒仓切线方向

图 9 JD1 滑升过程中沿筒仓半径与切线方向位移

Fig.9 The displacement along the radius and tangent direction of the cylindrical silo during the sliding process of JD1



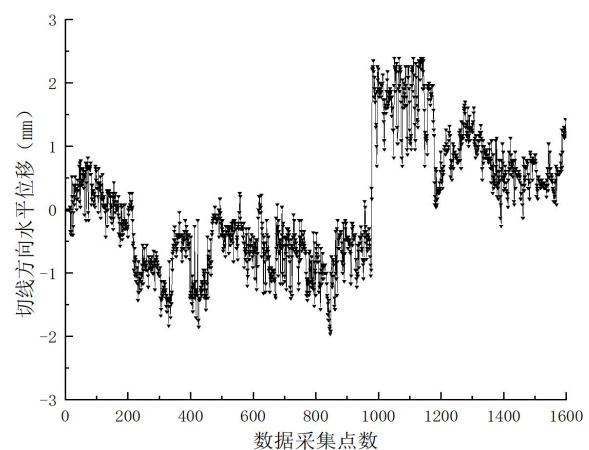
a 沿筒仓半径方向



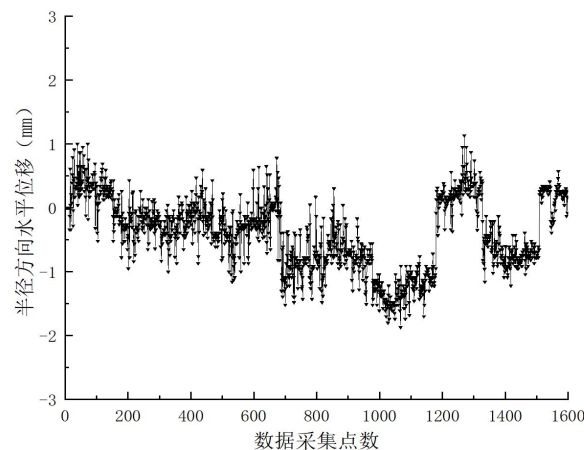
b 沿筒仓切线方向

图 10 JD2 滑升过程中沿筒仓半径与切线方向位移

Fig.10 The displacement along the radius and tangent direction of the cylindrical silo during the sliding process of JD2



a 沿筒仓半径方向



b 沿筒仓切线方向

图 11 JD3 滑升过程中沿筒仓半径与切线方向位移

Fig.11 The displacement along the radius and tangent direction of the cylindrical silo during the sliding process of JD3

4 结语

本文对青岛港某港区粮食筒仓工程滑模施工进行讨论分析,以筒仓液压滑模施工工艺为出发点,重点介绍本工程中滑模系统的组成系统、滑模施工工序及质量控制措施,并论证滑模液压系统的顶升能力,对滑模施工期间操作平台水平位移进行智能监测,结论如下。

1)液压滑模系统由液压提升系统、模板系统和操作平台系统 3 部分组成,本工程采用 56 台 GYD60 滚珠式千斤顶同步顶升,总起重量为 3 360kN,滑模提升总重设计值为 2 275kN,滑模系统的提升能力可满足滑模施工要求。

2)滑模施工工艺主要分为初滑、正常滑升和末升 3 个阶段,在滑模提升架安装位移传感器,监测滑升过程中平台水平位移,滑升过程中沿筒仓半径、切线方向位移均 $<3\text{mm}$,小于规范允许值,证明滑升过程中平台处于平稳状态,采取的防纠偏措施到位,且能保证仓壁混凝土浇筑尺寸偏差控制在允许值内。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家粮食局,财政部. 关于印发《粮食收储供应安全保障工程建设规划(2015-2020 年)》的通知[EB/OL].2015-03-23. National Development and Reform Commission, State Grain Administration, Ministry of Finance. Circular on the issuance of the construction plan for grain storage and

- supply security project (2015-2020)
[EB/OL].2015-03-23.
- [2] 吴锋. 港口工程高桩码头结构性能退化研究[D].上海: 上海交通大学, 2015.
WU F. Study on performance degradation of high-piled wharf structure in port engineering [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [3] 杨文武.港口经济是新时代港口城市的重要增长极[J].现代商贸工业,2024,45(3):1-3.
YANG W W. The port economy is an important growth pole of port cities in the new era[J]. Modern business trade industry, 2024,45(3): 1-3.
- [4] 王儒屹.浅谈融合背景下港口发展思路[J].交通财会,2024(1):88-90.
WANG R Y. A brief discussion on port development ideas under the background of integration[J]. Finance & accounting for transport, 2024(1) : 88-90.
- [5] 纪波.港口与航道建设的经济效益和社会影响分析[J].中国航务周刊,2024(1):95-97.
JI B. Analysis of the economic and social impact of port and waterway construction[J]. China shipping gazette, 2024(1): 95-97.
- [6] 王守忠.港口粮食筒仓设计[J].水运工程,1987(6):15-20.
WANG S Z. Design of port grain silo[J]. Port & waterway engineering, 1987(6) : 15-20.
- [7] 曾显波,王信友.港口钢板筒仓粮食板结预防与破结的方案设计[J].港口科技,2015(3):15-18.
ZENG X B, WANG X Y. Design of grain hardening prevention and fracture in port steel silos[J]. Port science & technology, 2015(3) : 15-18.
- [8] 王喜红,张雷,邓建芳,等.筒仓滑模施工技术研究[J].工程质量,2022,40(8):55-58.
WANG X H, ZHANG L, DENG J F, et al. Study on silo sliding form construction technology[J]. Construction quality, 2022, 40(8): 55-58.
- [9] 张夫.筒仓滑模技术的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2011.
ZHANG F. Application of silo sliding mode technology[D]. Xi ' an:Xi ' an University of Architecture and Technology, 2011.
- [10] 任添强.筒仓滑模施工中常见质量问题及对策探讨[J].价值工程,2018,37(21):182-183.
REN T Q. Discussion on common quality problems and countermeasures in silo sliding form construction [J]. Value engineering, 2018, 37(21):182-183.
- [11] 陈慧健,夏香港,田承尧,等.滑模施工在群筒结构中的应用[J].建筑安全,2023,38(11):15-18.
CHEN H J, XAI X G, TIAN C Y, et al. Application of slipform construction in group tube structures[J]. Construction safety, 2023, 38(11): 15-18.
- [12] 李学辉,余俊思,陈杰,等.出线竖井滑模混凝土施工质量控制[J].云南水力发电,2023,39(5):127-130.
LI X H, YU J S, CHEN J,et al. Quality control of sliding mode concrete construction for outgoing shaft[J]. Yunnan water power, 2023, 39(5): 127-130.
- [13] 盛超杰.滑动模板装置及施工方法研究[J].智能城市,2021,7(15):75-76.
SHENG C J. Research on sliding formwork device and construction method[J]. Intelligent city, 2021, 7 (15):75-76.
- [14] 张龙.大直径筒仓滑模施工技术[J].四川建材,2023,49(12):107-109.
ZHANG L. Slipform construction technology of large diameter silo[J]. Sichuan building materials, 2023, 49(12):107-109.
- [15] 马亚豪,俞荫州,郑义,等.浅谈浅圆仓滑模装置设计及施工[J].江西建材,2023(1):208-209,212.
MA Y H, YU Y Z, ZHENG Y, et al. Shallow silo sliding form device design and construction[J]. Jiangxi building materials, 2023(1): 208-209,212.