

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.011

全重力流进水的地下污水处理厂防淹设计

张真伟^{1,2}, 张诗雄^{1,2}, 陈俊^{1,2}, 李进^{1,2}, 陈聪^{1,2},
周文俊^{1,2}, 李明蔚^{1,2}

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中建武汉黄孝河机场河水环境综合治理建设运营有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要: 防淹设计是地下污水处理厂安全设计的重中之重,以华中地区第一座全地下污水处理厂——铁路桥地下净水厂为例,针对其水淹风险来源,详细介绍了其在防淹方面的设计。铁路桥地下净水厂除常规结构防水、建筑防雨、厂区排水、溢流控制、水位监测等防淹设计外,更核心的是结合全重力流进水特点,设计进水流量精准控制、进水口紧急关闭、双回路供电等防淹系统。结合一年多的运行情况可知,面对厂区突发状况,防淹设计发挥了重要作用,有效避免了净水厂的水淹风险,可为其他类似项目提供借鉴。

关键词: 地下污水处理厂; 防淹设计; 全重力流进水; 流量控制; 双回路供电

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0069-06

Anti-flooding Design of Underground Sewage Treatment Plant with Gravity-flow Inflow

ZHANG Zhen-wei^{1,2}, ZHANG Shi-xiong^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, LI Jin^{1,2}, CHEN Cong^{1,2},
ZHOU Wen-jun^{1,2}, LI Ming-wei^{1,2}

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China;

2. China Construction Wuhan Huangxiao River and Airport River Water Environment

Comprehensive Treatment Construction and Operation Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: Anti-flooding design is the top priority in the safety design of underground sewage treatment plant. This paper introduced the anti-flooding design of Tieluqiao underground sewage treatment plant (the first underground sewage treatment plant in Central China) in detail according to its flooding risk sources. In addition to the design such as conventional structural waterproofing, building rain prevention, plant drainage, overflow control, water level monitoring and other anti-flooding measures, the key design points of Tieluqiao underground sewage treatment plant based on gravity-flow inflow included accurate inlet flow control system, water inlet emergency closure system, double circuit power supply and other anti-flooding systems. According to more than a year's operation, it can be seen that in the face of emergency situations, the anti-flooding design played an important role in effectively controlling the flooding risk of the sewage treatment plant. The results aim to provide reference for other similar projects.

Key words: underground sewage treatment plant; anti-flooding design; gravity-flow inflow;

通信作者: 张真伟 E-mail: 583122213@qq.com

flow control; double circuit power supply

地下污水处理厂由于其环境友好、节约用地、可以实现土地的综合开发利用以及能较好地解决邻避效应等显著优势,得到了推广和应用^[1-6]。目前国内已建和在建规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的地下式污水处理厂已逾 113 座,分布在 25 个省市,其中以经济相对发达的广东和浙江数量最多,充分体现了城市发展对改善环境和节约土地的迫切需求^[7-8]。随着大量项目落地,地下污水处理厂固有的一些问题在设计和运行过程中逐渐显现,其中水淹事故是其面临的重大风险之一,一旦发生,会给污水处理厂带来较大的经济损失和安全隐患。因此,在项目建设尤其是设计过程中,应充分考虑可能存在的水淹风险,并事先采取相应的防范措施^[9]。目前,国内对全重力流进水的地下污水处理厂防淹设计方面的研究及报道较为少见,以铁路桥地下净水厂为例进行分析,详细介绍其在防淹方面的设计思路,旨在为其他类似项目的设计或运行提供借鉴。

1 工程概况

铁路桥地下净水厂为全地下式污水处理厂,主要处理汉口片区合流制生活污水,采用全重力流进水,核心工艺为 $A^2/O+MBR$,设计处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水总变化系数为 1.3。工艺流程见图 1。

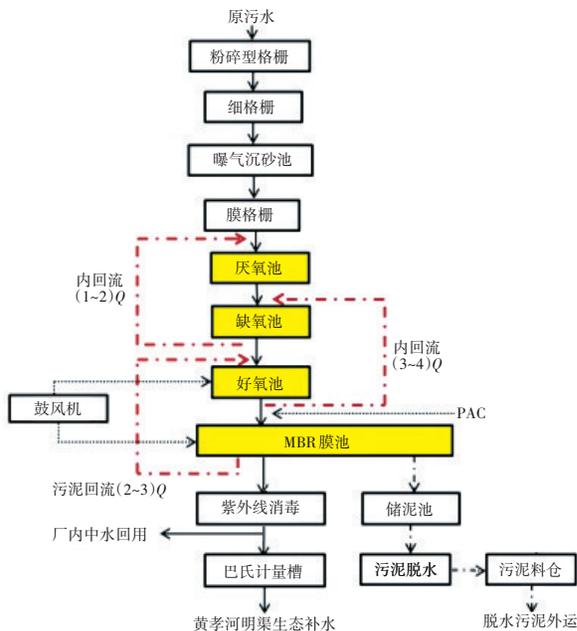


图 1 工艺流程

Fig.1 Process flow

厂区剖面见图 2。主要设计工艺参数如下:厌氧池、缺氧池、好氧池的水力停留时间分别为 1.60、3.65、5.10 h,生物池污泥负荷为 $0.055 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。



图 2 厂区剖面

Fig.2 Section of the sewage treatment plant

2 水淹风险来源

该地下污水厂设计地面标高为 21 m(1985 国家高程,下同),地下箱体顶标高为 19.5 m,底标高为 6 m,整个箱体全部位于地下。该污水厂的水淹风险主要来源于地下水、雨水、超量进水、构筑物溢流污水等。

2.1 地下水

该地下污水厂的场地上层滞水静止水位高程为 17.09 ~ 20.56 m,承压水水位高程为 12.23 m。场地上层滞水和孔隙承压水对地下箱体的风险主要来自于箱体本身结构和进出水管道口的渗漏,这会给地下箱体内设备,尤其是供电设备带来较大的危害。

2.2 雨水

该地下污水厂地面共设有 10 个楼梯间、2 条车道、2 个永久吊装孔、5 个排烟井、3 个进风井、2 个采光天井,存在降雨进入地下箱体的风险,导致污水厂出现水淹可能。

2.3 超量进水

该地下污水厂采用全重力流进水,与常规污水厂的不同之处在于前端无提升泵控制进水量。在全重力流进水模式下,若无有效措施对进水量进行严格控制,大雨、暴雨时进水液位急剧上升,大量污水快速进入地下箱体,一旦超出产水泵产能,将导致箱体快速被淹,危险极大。

2.4 构筑物溢流污水

已进入箱体的污水由于工艺控制原因也存在溢流风险,主要溢流因素包括:①细格栅、膜格栅堵塞未能及时清理,导致预处理间溢流;②生物池水位过高,导致生物池溢流;③膜池产水量低于进水量,时间过久导致膜池、生物池液位过高溢流;④溢流泵房、排水泵房提升泵故障,导致泵房污水外溢。

3 防淹系统设计

3.1 针对地下水渗入的防淹设计

针对场区地下水,主要从结构方面考虑污水厂的防水设计,包括地下车间结构顶板、侧墙及底板。主体结构采用自防水钢筋混凝土,地下一层防水混凝土设计抗渗等级为P6,地下二层为P8。顶板防水由下至上依次采取下表面防水涂层+钢筋混凝土P6自防水结构层+上表面防水涂层+4 mm厚SBS改性沥青防水卷材+4 mm厚SBS改性沥青耐穿刺防水卷材;侧墙防水采用内表面防水涂层+钢筋混凝土P8(或P6)自防水结构层+1.5 mm厚高分子自粘胶膜防水卷材;底板防水由下至上采用1.5 mm厚高分子自粘胶膜防水卷材+钢筋混凝土P8自防水结构层+上表面防水涂层。

3.2 针对雨水侵入的防淹设计

所有楼梯间、风井均有防雨措施,楼梯间门口标高比地表高30 cm,屋面雨水由雨水斗收集后排至厂区雨水系统。车道顶部设钢结构玻璃顶棚,车道地面入口、两侧及与地下空间衔接处均设排水沟,排水引向地下箱体的溢流泵房。综合楼天井四周设排水沟,最低点设有集水坑,通过泵将综合楼雨水抽排至地表雨水系统。

3.3 针对超量进水的防淹设计

污水厂雨天时的进水量大于晴天在国内是较为普遍的现象,即使污水厂所在的排水系统采用分流制,也总会存在一些混接现象,导致雨天时来水量增大,这对全地下污水处理厂的防汛安全而言是一个考验^[10]。针对可能存在的超量进水,主要通过两方面进行控制:一是进水流量精准控制系统,二是进水口紧急关闭系统。

3.3.1 进水流量精准控制系统

进水流量精准控制系统由智能液动下开式堰门和智能流量调节闸两套装置组成。

① 智能液动下开式堰门

智能液动下开式堰门安装于进水结合井,前后配套超声波液位计,获取堰门上下游水位实时监测信号和堰门开度信号。通过内部算法及设置的进水流量,液压驱动实现堰门高度的自动调节,可精确控制进入地下污水厂的流量。

② 智能流量调节闸

地下污水厂的2根DN1 000进水管道均装有电磁流量计,可实时监测管道内流量,并叠加计算管道总流量,流量计与智能流量调节闸连锁。

智能流量调节闸根据进水流量实时监测值,自动调节闸门开启度,实现恒定流量控制。如进水量设置为4 167 m³/h,当外水液位高、进水瞬时流量超过设定值10%并持续60 s时,智能流量调节闸自动调小闸门开度,直至达到设定流量方停止动作;当外水液位低,进水瞬时流量低于设定值10%并持续60 s时,智能流量调节闸则自动调大闸门开度,直至达到设定流量方停止动作,从而最终实现地下污水厂进水流量的控制和调节。

为防止正常进水时厂内操作失误导致的内部淹水,智能流量调节闸还与细格栅前池液位联动,当细格栅前池水位达到溢流液位(14.65 m)时,闸门报警提示;当液位继续上升至14.95 m(可设置)时,迅速关闭闸门($T \leq 6$ s),防止预处理间溢流。

进水流量精准控制系统是地下污水厂防淹的关键系统,智能液动下开式堰门和智能流量调节闸均具有独立的流量监测和流量调整手段。二者独立运行,同时也能进行数据通信。计算两处的平均进水量,再与现状进水量、设定进水量对比,而后各自调整开度,使平均进水量不断趋于设定值,从而实现精准控制。在接收到中控室紧急关闭指令后,二者均可快速关闭,共同形成地下污水厂重力流进水流量调控的双保险。

3.3.2 进水口紧急关闭系统

针对可能存在的紧急情况,在地下污水厂进水干管装有液压速闭阀,此为地下污水厂发生事故停电时的重要安全设备。当正常运行时,速闭阀在30 s匀速启闭(6~120 s可调);当遇紧急情况时,可在6 s快速关闭(5~15 s可调)。装置由紧急电力供给电源(EPS)供电,装置意外失电时就地声光报警,并上传报警信号至中控室。速闭阀通过现场人工操作或接收到上位机紧急关闭指令时可快速关闭,防止地下污水厂被淹。

3.4 针对构筑物溢流污水的防淹设计

3.4.1 排水系统防淹设计

针对可能存在的溢流污水,厂内设有专门的排水系统进行收集、抽排。排水系统包括排水泵房、预处理滤后液泵坑,抽排的污水全部进入预处理区域。根据地下污水厂流量,通过变频调速泵控制回流至预处理前端的水量。当泵发生故障或泵房出现超高水位时,报警信号上传至中控蜂鸣报警器。

3.4.2 溢流系统防淹设计

地下污水厂在细格栅前端、缺氧池、膜池反冲洗水池设有溢流管至溢流泵房,作为正常工况的排水和异常工况的溢流缓冲,水池容积较大,可保护地下污水厂不被水淹。正常工况时,溢流泵房无溢流进水;溢流情况发生时,溢流泵房收集、存储各个构筑物的溢流污水,防止漫流导致地下车间受淹;溢流情况停止后,应急溢流泵房的污水由潜污泵均匀抽排至进水端,从而保证地下污水厂的安全。溢流泵房设有2台变频泵,通过液位控制启停,互为备用,自动轮换运行。当泵房液位达到启动条件时,若污水厂进水瞬时流量低于最大设定值,泵启动;若污水厂进水瞬时流量达到或超过最大设定值,泵停止运行。当泵发生故障或泵房出现超高水位时,报警信号上传至中控蜂鸣报警器。

3.5 电气自控防淹设计

3.5.1 中心控制系统

中心控制系统主要用于协调全厂防水淹系统的运行,保证地下污水厂的安全。当进水流量正常、水位监控点水位异常升高时,中心控制系统会立即发出报警信号。满足以下条件之一,可视为紧急情况,需要关闭进、出水通道:①两段高压母线失电时报警,延时 t_1 (可调)系统自动发出紧急关闭指令;②进水流量超过预警值、溢流泵房水位超过超高水位时报警,延时 t_2 (可调)等待操作员下达紧急关闭指令,延时 t_3 (可调)系统自动发出紧急关闭指令。紧急关闭顺序:进水速闭阀→智能液动下开式堰门→智能流量调节闸。中控室后台具备异常工况、异常水位及失电的报警信息发布功能,所有运维人员及领导或决策者均能收到报警信息,以便及时处理。

3.5.2 地下空间水位监测系统

地下空间水位监测分为常规监测和局部重点监测。常规监测是在厂区不同分区和低洼地段设

置液位开关,监测厂区异常水位。局部重点监测是在工艺流程关键段设置水位监测装置,保障地下空间不被水淹。常规监测点包括:预处理设备间、管廊、膜池设备间、脱水车间、紫外消毒间,均采用液位开关进行监测。局部重点监测包括进水端河道明渠液位、细格栅前池液位、预处理分离水泵坑液位、缺氧池液位、排水泵房液位、溢流泵房液位、膜池反冲洗水池液位、出水端河道明渠液位,采用超声波液位计、静压式液位计2种设备同时进行监测。

3.5.3 双回路供电

铁路桥地下净水厂属于全地下式污水处理厂,供电负荷等级为二级;地下设施配置的防淹排水设备及地下污水厂设备监控自动化系统为特别重要的设施,供电负荷等级为一级。地下净水厂采用双回路电源供电,电压等级为10 kV,两路电源同时使用并能互相切换,任意一路电源均可承担100%负荷。当主供回路电源发生故障时,备供回路电源能维持全厂连续安全供电。所有重要设备分组采用不同回路,如MBR膜池7台产水泵中3台采用1条回路供电,另外4台采用另1条供电,当1条回路断电时,另1条上的设备依旧可以正常工作,从而有效避免停电时厂内产水无法外排的问题。

3.5.4 防淹设备EPS应急供电

变配电中心设置2组EPS应急电源,其中1组应急电源作为地下污水厂排渍防淹的关键设备(如进水调控堰门、速闭阀、进水调节阀、排水泵、溢流泵等)的应急备用电源,当厂区停电时,应急电源可在0.2 s内立即投用,并能维持防淹关键设备持续运行90 min;另1组应急电源作为地下污水厂变配电间设备(如照明、电力监控系统等)的应急备用电源。另设置1组不间断电源(UPS),作为可编程逻辑控制器(PLC)系统的电源,保证供电可靠性。

4 防淹设计实际运行效果

铁路桥地下净水厂自2022年2月开始进水调试,2022年4月开始稳定生产。

4.1 进水流量精准控制系统运行效果

铁路桥地下净水厂进水端为合流制暗涵,长度约5.4 km,晴天时来水基本为上游居民生活用水,暗涵液位波动较为规律。来水向铁路桥地下净水厂及另一污水处理厂进行分配,铁路桥地下净水厂为重力流进水,进水量受暗涵液位波动影响较大,

另一污水厂采用泵抽排方式,受影响相对较小。铁路桥地下净水厂在暗涵液位较低时,进水流量精准控制系统发挥作用,进水口下开堰、智能流量调节阀开度会逐渐变大,甚至全开以尽可能多进水;当暗涵液位较高、进水流量超过净水厂处理能力(或设定的最高进水流量)时,下开堰、智能流量调节阀又会自动调整至较小开度,从而控制总进水量。

选取2022年8月9日—11日数据,分析在关闭进水流量精准控制系统的情况下进水流量与暗涵液位的关系,每间隔1 min取1组数据,拟合二者线性关系($R^2=0.9924$),如下式所示:

$$y = 4290.4x - 62799 \quad (1)$$

式中: x 为黄孝河暗涵液位, m; y 为铁路桥地下净水厂瞬时进水量, m^3/h 。

当暗涵液位为15.6 m、智能流量调节阀全开时,进水量约为4167 m^3/h ,即达到设计水量 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

选取2023年5月21日—28日数据进行分析,进水量与暗涵液位关系如图3所示。

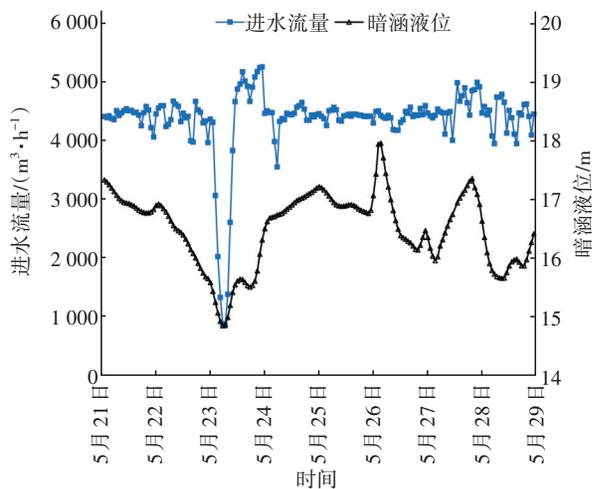


图3 进水量与暗涵液位关系

Fig.3 Relationship between inlet flow and hidden culvert liquid level

由图3可知,5月21日—22日暗涵液位为15.6~17.5 m,净水厂进水量基本稳定在4000~5000 m^3/h 。5月23日时暗涵液位急剧下降,最低为14.85 m,进水下开堰及智能流量调节阀逐渐打开,但由于前端液位过低,进水量快速降低,当液位恢复至15.6 m左右时,流量又快速上升并逐渐达到满负荷状态。当液位继续上升时,进水流量精准控制系统再次发挥作用,下开堰、智能流量调节阀开度

又逐渐减小,对过量来水进行限制,确保进水量稳定在4000~5000 m^3/h 左右。5月26日—27日,受降雨影响,暗涵液位出现较大波动,最低为15.96 m,最高为17.96 m。由式(1)可知,当暗涵液位为17.96 m时,关闭流量精准控制系统的地下污水厂进水量理论值为14256 m^3/h ,远大于污水厂的处理能力。而实际上其进水量基本持续稳定在4000~5000 m^3/h ,充分说明进水量精准控制系统发挥了限流防淹作用。

4.2 双回路供电防淹设计效果

2023年5月27日铁路桥地下净水厂其中一条供电线路突发性停电,由于采用双回路供电设计,厂区关键设备中有一半未发生停电,同时进水口紧急关闭系统发挥作用,关闭进水液压速闭阀停止进水。停电10 min左右值班人员及时切换至另一回路,立即恢复正常生产。停电期间,厂区预处理区、生物池、膜池液位均在正常波动范围内,未发生水淹事故。

至2023年5月,铁路桥地下净水厂已运行一年以上,厂区未发生水淹事故,特别是双回路供电设计、进水口紧急关闭和进水量精准控制设计,在突发停电、进水液位急剧波动时发挥了重要作用,从而有效保证了该全重力流地下污水厂的稳定运行。当然,部分防淹设计在实际运行中尚未有机会完全发挥作用,后期还需进一步验证。

5 结论

安全设计是地下污水处理厂设计中的重中之重,对全重力流进水的地下污水处理厂而言,由于进水受来水液位影响较大,其防淹设计除了常规结构防水、建筑防雨、厂区排水、溢流控制、水位监测等防淹设计外,还应结合其进水特点,重点从进水量精准控制、进水口紧急关闭、双回路供电、防淹系统的运行逻辑及协调等方面进行防淹设计,从而有效保证地下污水厂的安全运行。

参考文献:

- [1] 谭学军,唐利,郭东军. 地下污水处理厂优势分析与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(8): 1313-1319.
TAN Xuejun, TANG Li, GUO Dongjun. Analysis and prospect of underground sewage treatment plant [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,

- 2006, 2(8): 1313-1319 (in Chinese).
- [2] 陈贻龙. 地下式 MBR 工艺在广州京溪地下污水处理厂的应用[J]. 给水排水, 2010, 36(7): 51-54.
CHEN Yilong. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 51-54 (in Chinese).
- [3] 张永森, 李国金, 刘振, 等. 两级活性焦吸附工艺用于全地下污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(14): 120-123.
ZHANG Yongsen, LI Guojin, LIU Zhen, et al. Application of two-stage activated coke adsorption process in an all-underground WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(14): 120-123 (in Chinese).
- [4] 初振宇, 李骏飞, 林英, 等. MBBR+磁混凝+反硝化滤池工艺用于全地下污水厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 80-84.
CHU Zhenyu, LI Junfei, LIN Ying, et al. Application of MBBR, magnetic coagulation and denitrification deep bed filter process in an underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 80-84 (in Chinese).
- [5] 刘林富. 多模式 A²O+高效沉淀+V型滤池用于地下式污水厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 62-66.
LIU Linfu. Application of multi-mode A²O, high efficiency precipitation and V-type filter combined process in underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 62-66 (in Chinese).
- [6] 周建忠, 胡晓, 王麒麟, 等. 多段多级 AO 工艺用于全地下式陡沟河污水处理厂二厂[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 48-54.
ZHOU Jianzhong, HU Xiao, WANG Qilin, et al. Application of multi-stage AO process in Dougouhe No. 2 underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 48-54 (in Chinese).
- [7] 陈秀成. 地下式污水处理厂用地指标分析及节地设计方向[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 53-58.
CHEN Xiucheng. Analysis of land quota and land conservation design direction of underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(4): 53-58 (in Chinese).
- [8] 董磊, 张欣, 杨一烽. 《城镇地下式污水处理厂技术规程》要点简析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(16): 14-20.
DONG Lei, ZHANG Xin, YANG Yifeng. Synopsis of key points for *Technical Specification for Urban Underground Wastewater Treatment Plant* [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(16): 14-20 (in Chinese).
- [9] 陈秀成. 全地下污水处理厂防淹设计要点及工程案例[J]. 给水排水, 2022, 48(5): 50-59.
CHEN Xiucheng. Key points of flood prevention design and engineering examples of underground municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(5): 50-59 (in Chinese).
- [10] 陈秀成, 牛天浩. 上海泰和全地下大型污水处理厂工艺设计要点及特点[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 83-88.
CHEN Xiucheng, NIU Tianhao. Key points and characteristics of process design of Taihe underground large sewage treatment plant in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 83-88 (in Chinese).

作者简介:张真伟(1986-),男,湖北枣阳人,本科,工程师,主要研究方向为流域水环境综合治理及市政污水处理。

E-mail:583122213@qq.com

收稿日期:2023-04-29

修回日期:2023-08-07

(编辑:沈靖怡)