



引江济淮通航渡槽水桥工程设计哲学与应用

杨善红

安徽省综合交通研究院股份有限公司, 合肥 230088

摘要: 引江济淮通航渡槽水桥是一座通水、通航的世界级水桥, 也是上下两条河道垂直交叉的水立交。该桥承受着旱、涝水位下近 4 万 t 变化的超级可变重载, 这在国内外尚属首例, 由此带来一系列问题均鲜有先例可循, 少知和未知问题突出。渡槽水桥创新创造性提出的左右分幅、一分为二, 上桁下拱、合二为一, 上开下合、相克相生, 外桁内波、对立统一的总体概念设计和工程哲学思想, 成功地解决了渡槽水桥特有的上下、左右、内外、表里以及分合、即离、刚柔、虚实的问题。

关键词: 概念设计; 工程哲学; 超级可变重载; 渡槽水桥; 引江济淮

中图分类号: T-01

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)02-0268-12

引言

引江济淮工程是安徽省重大民生工程, 堪称省内的“南水北调”项目。工程通过将长江水引入淮河, 进而输往皖北及河南等地, 对区域水资源调配、经济发展和生态改善具有重要意义^[1]。在合肥西郊靠近江淮分水岭处, 引江济淮河道与淠河总干渠相交(图 1)^[2]。由于引江济淮河道在此处下挖约 36 m, 两条河道无法平面交汇, 形成了高差显著的空间立体十字交叉结构。这一独特构造造就了罕

见的“河上有河、船上有船”水立交景观。为确保上层河道畅通通行, 须在此建设一座兼具通水和通航功能的大桥^{[3]①}。

由此建成的引江济淮通航渡槽水桥(后文简称渡槽水桥), 是一座集通水、通航功能于一体的世界级水桥, 也是上下两条河道垂直交叉的水立交工程。该桥采用主跨 110 m 的钢桁梁拱组合结构, 于 2023 年 2 月建成并投入使用, 至今运行状况良好。这座新颖的“水桥”已成为市民郊游、摄影的热门之地。随着百里画廊文旅发展策划和世界水桥

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-04-05

作者简介: 杨善红(1971—), 男, 正高级工程师。研究方向为桥梁工程设计、桥梁美学、工程哲学。E-mail: yshanhong@qq.com

引用格式: 杨善红. 引江济淮通航渡槽水桥工程设计哲学与应用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(2): 268-279. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250020. CSTR: 32282.14.JES.20250020

Yang S H. Design Philosophy and Its Application of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge [J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(2): 268-279. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250020. CSTR: 32282.14.JES.20250020

① 引江济淮通航渡槽水桥获得 2023 年国际亚瑟·海顿奖; 录入中宣部、安徽省委宣传部重点文艺项目, 安徽广播电视台出品的六集纪录片《千里江入淮》第三集《飞槽渡》。

景区规划建设的推进^[4], 它必将成为城市的新地标。

然而, 这座渡槽水桥的建设面临着诸多前所未有的技术挑战: 淠河总干渠季节性特征明显, 水深变化幅度大, 桥梁承受的水荷载巨大且变化剧烈, 远超常规桥梁, 对桥梁抗力构成极大考验; 施工需采用“先建桥后挖河”的非常规工序, 在膨胀土地区开挖河道易导致边坡失稳, 威胁桥梁基础安全^[5]; 干渠作为通航河道, 要求采用超大超宽的开口U形槽结构, 桥梁侧向刚度和扭转刚度的控制难度显著增加; 钢结构桥梁在温度作用下热胀冷缩效应明显, 疲劳变形隐患突出。这些问题鲜有工程先例可循, 难以提前定性定量分析, 给设计和施工带来了巨大挑战。

针对这些难题, 引江济淮通航渡槽水桥项目团队(后简称“项目团队”)创新提出了“左右分幅、一分为二, 上桁下拱、合二为一, 上开下合、相克相生, 外桁内波、对立统一”的总体概念设计和工程哲学思想。本文将详细阐述这一创新设计理念及其在解决引渡槽水桥建设工程特有问题中的应用, 为类似复杂桥梁工程的设计与建设提供参考, 推动桥梁工程领域在应对复杂荷载、特殊施工条件等方面的技术进步, 同时为工程设计中融合哲学思维提供实践范例。

1 引江济淮通航渡槽水桥技术难点与挑战

1.1 渡槽水桥桥梁承受的水荷载巨大且变化剧烈

由于淠河总干渠河道狭长且较浅, 具有地上河特征, 其季节性变化显著, 水深变幅较大, 平均水深2~4 m, 极值水深1~5 m。满水状态下, 桥上最大水体重量达39754 t(约4万t), 相当于135个公路车道或25个铁路线的荷载(图2); 此时桥梁承受的水荷载为自重的200%, 较常规桥梁20%的自重荷载高出近10倍, 实属罕见。枯水季节浅水期, 桥梁则几乎不受水荷载影响。因此, 该桥不仅承受超量级荷载, 更须具备显著的荷载波动特征——这种荷载极值差异大、变化剧烈的特点, 既是桥梁最关键的受力特征, 也是对其抗竖向变位能力的严峻考验^[2]。

1.2 渡槽水桥需采用“先建桥后挖河”的非常规施工工序

由于引江济淮河道需在干渠下方开挖近36 m深、280 m宽的沟槽(图3), 这将中断干渠供水。但干渠承担着向合肥市供水的任务, 施工期间必须保持通航, 因此无法在原干渠河道处直接修建水桥, 需另行选址建设。待新水桥建成后, 将干渠改道至新桥, 废弃旧河道, 再进行引江济淮河道的开挖施工。这种“先建桥后挖河”的逆操作施工流程, 要求在已建桥



图1 引江济淮通航渡槽水桥项目地理信息示意图^[2]

Figure 1 Geographic information schematic diagram of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge Project^[2]

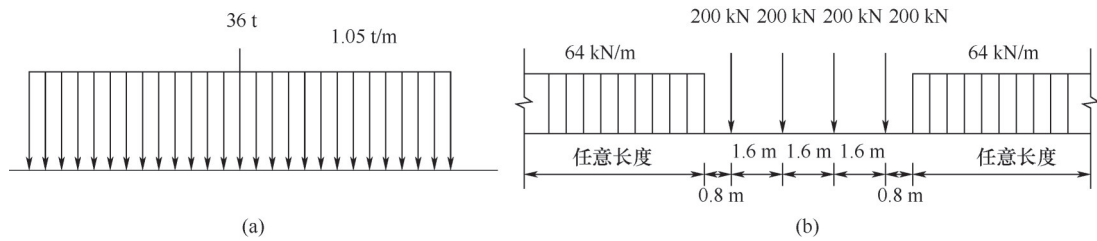


图2 公路 (a) 和铁路 (b) 荷载示意图

Figure 2 Schematic diagram of highway(a)and railway loads(b)

梁基础旁进行深基坑开挖。而因其在江淮分水岭的膨胀土区域, 开挖后的河道边坡经水浸润后易发生膨胀蠕变, 可能导致边坡失稳, 进而对邻近的桥梁基础产生偏载侧压^[5]。有鉴于此, 针对这种特殊工况, 必须提前做好桥梁基础安全的预控措施。

1.3 渡槽水桥桥梁侧向刚度和扭转刚度的控制难度显著

由于干渠为通航河道, 需要 32 m 的槽宽, 属于超大、超宽、敞口 U 形槽结构。此类宽扁开口断面本身具有不稳定性, 但受通航条件限制, 无法采用闭口或锁口设计。尤其在受到大质量水体侧压、晃动及船舶撞击等作用时, U 形槽易发生扭转、侧倾等变形运动。因此, 控制桥梁的侧向刚度和扭转刚度成为必须解决的关键问题。

1.4 渡槽水桥钢结构桥梁热胀冷缩效应明显, 疲劳变形隐患突出

于渡槽水桥而言, 水是承载的核心要素。面对如

此重载, 桥梁自然要采用钢结构。在温度变化影响下, 尤其是在温差显著的工况中, 水的低温特性与钢材的高温特性形成鲜明对比——盛夏时节温差可达 60℃之巨, 由此引发的热胀冷缩效应极为显著, 而且还应考虑钢结构经年累月的疲劳变形隐患, 这类长期不利影响必须杜绝。

综上, 四大特殊建设条件与常规桥梁差异显著, 而且由此衍生的系列问题鲜有先例, 既有认知局限又存在未知领域, 难以快速定性, 更难立即定量。特殊桥梁自有其特质, 解决之道也需独辟蹊径, 但万变不离其宗, 理论推导与概念先行尤显关键^[6]。

2 引江济淮通航渡槽水桥总体概念设计和工程哲学思想

以引江济淮通航渡槽水桥的问题为导向, 采用由概念设计定性到方案设计定量, 从抽象模糊到具体清晰的演化和优化方法, 进行全过程探索性设计, 这是非常必要的, 也可能是最为有效的。同时, 在少知、

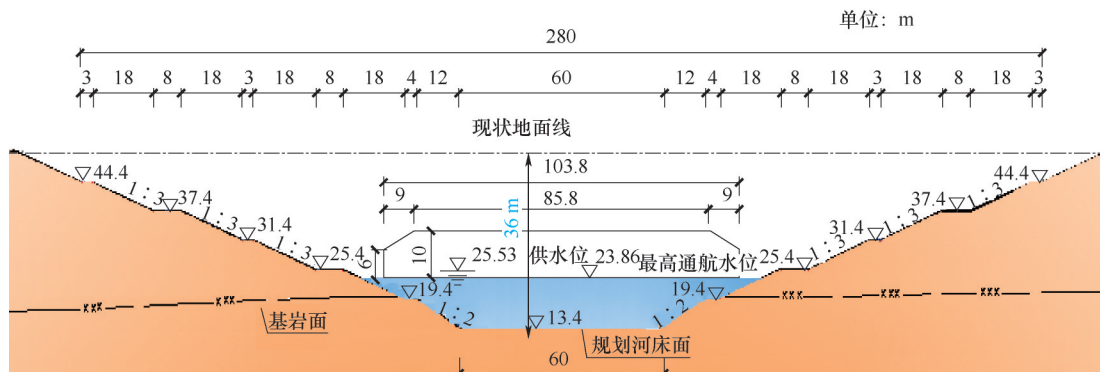


图3 引江济淮通航渡槽水桥桥址开挖断面图

Figure 3 Excavation cross-section diagram of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge Project

未知、少见、逆常规的情况下,既要本桥特有的超量级重载与桥梁抗力矛盾、先建才能后挖矛盾、开口不能闭合矛盾、水凉而钢热矛盾这些相克又要相生、对立还要统一的等等问题一一思辨,还要一一化解,势必做到:道法自然,方可大道至简^[7]。后文将逐条阐述。

2.1 创新结构组合方式,解决超级下挠和起伏

基于水重远大于桥重的事实,是否必须建造成庞然大物才能承受4万t荷载?若建成如此庞大的结构,它还能称之为桥吗?能否效仿高速公路模式,将渡槽水桥战略性地分为双幅设计?这样桥梁荷载可立即减半,从4万t降至2万t,效果会立竿见影。因此项目团队大胆地向水利部提出申请,经过水利、通航等技术研究评估并成功得到批复,得以将32m槽宽变更为2个16m的槽宽,整幅结构变为左右分离的双幅窄桥。这一“一分为二”的方案可使事半功倍,避免了仅着眼于提升桥梁结构受力的单一思路。改为双幅后,桥梁荷载减轻一半,承载能力显著提升,同时桥宽缩减近半,有效缓解了横向宽扁开口断面问题。实践证明,这种分离设计成效显著。

虽然单幅桥梁承受2万t水荷载,但水重桥重比未根本改变,桥梁向下的挠度依然很大,因而又回到了桥梁承载能力,即刚度问题。由于梁高不能无限增加(否则将完全丧失桥梁的优雅形态),可采用常规梁桥力学手段:可以用预应力、斜拉索、吊杆等外力来主动张拉,以提高桥梁的承载能力,由平到斜再到竖,随着角度和施力的增大,也可以达到预期效果(图4)。

但渡槽水桥因跨越季节性河流,可变的超级重载

必然引起桥梁竖向的挠度起伏,水来了则向下挠,就算利用外力扛住了,水走了就会反过来向上挠。预应力、斜拉索、吊杆等外部支撑虽能承担1/3桥梁自重,但主要用以抗衡2/3水体重量——若水位下降,这2/3的支撑力便会形成冗余,后果自然堪忧。由此可见,超级可变的重载性能才应是渡槽水桥的自有特征,主动的外力反而不好,被动的内力才是最佳选择。面对这种特殊荷载,关键在于:如何设计桥梁?既能抵御汛期下压,又可避免枯水期上抬?既然预应力等外力手段不可用,唯有依托结构自身。渡槽水桥的装水槽在相同水深条件下,沿长度方向必然是一道等高梁。若仅依靠梁自身承重,则需不断加大梁高直至满足荷载要求,但这显然并非最优方案。

渡槽水桥下方设有36m的净空,使开挖后的河道呈现出“峡谷”风貌,因此拱桥自然成为跨越这座“峡谷”的理想选择。设计采用等高的槽梁与拱式结构相结合的形式,将过水的槽梁和承力的拱合二为一(图5)。这种结构的工作原理是:当有水通过时,水压作用于梁,梁将力传递给拱,由拱梁共同承担荷载,拱更能抗压;当无水通过时,拱的自重与梁的压力相互作用,拱梁结构产生可控的微小位移。这种梁拱一体化设计充分发挥了各自的特点和优势——拱自身上拱较小,而梁又能抵抗拱的上拱^[8]。因此,无论是否有水通过,桥梁都能保持稳定,既满足刚度要求,又解决了挠度波动问题。同时,这种拱式桥设计与峡谷地貌相得益彰,形成了和谐的景观效果。

经设计与计算,最终采用梁拱组合的桁架结构。桥梁跨径布置为68m+110m+68m,总长246m(图5),目前位列世界第一。该设计体现了“求取最大公

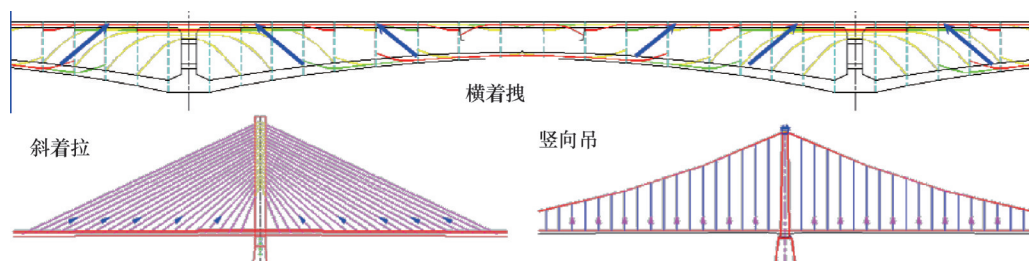


图4 不同桥式竖向变形能效示意图

Figure 4 Schematic diagram of vertical deformation efficiency for different bridge types

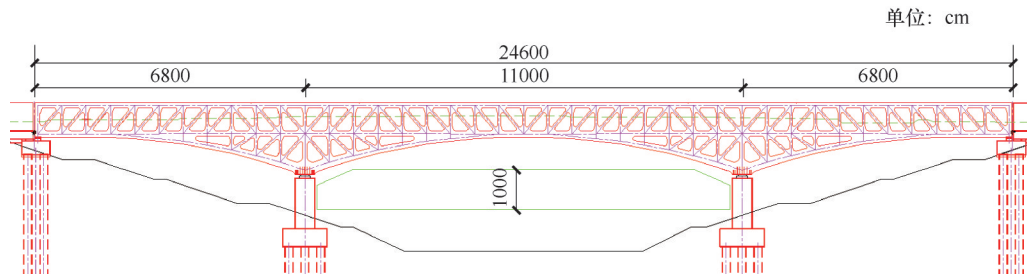


图5 引江济淮通航渡槽水桥总体布置图

Figure 5 General layout of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge

约数, 以最大换最小; 求取最小公倍数, 以最小换最大”的优化理念, 通过“一分为二、合二为一”的灵活运用, 实现了结构构件之间的最小互让和最大互帮, 最终达成了最大的互惠效果。

2.2 巧设平联以下制上, 应对横向变形和扭转

由于U形过水槽的横向断面为开口结构, 为确保这一不稳定结构的稳定性, 必须加强侧壁的侧向刚度和底部的横向刚度。马格德堡水桥^[9-10]^①和三峡升船机槽壁^[11]^②均采用外桁架+内加劲壁板的双层结构^[12]。为综合解决横向变形和结构扭转难题, 渡槽水桥槽体结构则采取了如下设计(图6):

(1) 结构构型: 主体采用U形槽体与下部双拱片组合, 形成H形复合结构; U形上部保持必要开口(类似订书钉形态); H形结构上下均呈开口状态(形似跷跷板)。

(2) 稳定性控制措施: 通过在H形结构下部设置M形平联构件实现闭口转换; 形成“上开下闭”的横断面形式; 运用杠杆原理实现“以下制上”的稳定机制, 有效控制侧倾自由度。

(3) 平联系统的多功能设计: 采用M形双顶点构造可为渡槽底板提供抗压弯支撑, 并且通过约束效应传递扭转刚度。

像杠杆原理这样的基本法则, 其实是浅显易懂

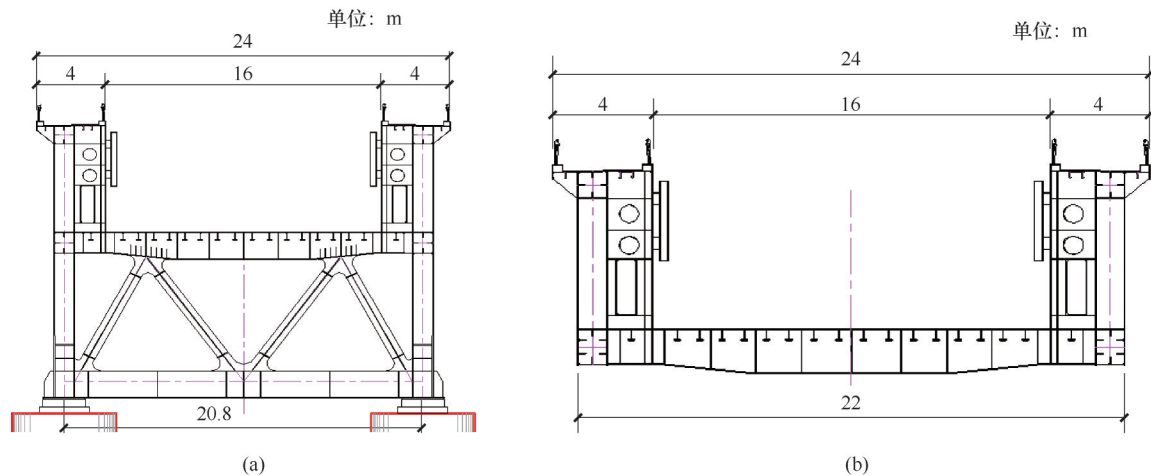


图6 引江济淮通航渡槽水桥H形负荷结构的M形平联构件及横断面图

Figure 6 The M-shaped bracing member and cross-section diagram of the H-shaped load-bearing structure for the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge

① 马格德堡水桥 (Magdeburg Water Bridge) 是德国一项著名的水利工程和桥梁建筑杰作, 横跨易北河 (Elbe River), 连接中部运河 (Mittelland Canal) 和易北-哈弗尔运河 (Elbe-Havel Canal)。它的主要功能是允许船只跨越易北河, 而不必绕行或通过船闸系统, 极大地缩短了航运时间, 提升了运输效率。

② 三峡升船机是世界上规模最大、技术难度最高的垂直升船机, 其槽壁结构是确保船舶安全升降的关键承力与导向系统。

的,也是公知公认的,在思辩的工程世界中探寻造物皆有本源,在万变不离其宗中寻求正解,大道至简则若烹小鲜。

2.3 槽桥内外分合化繁为简,实现受力传递巧妙高效

渡槽水桥的槽用于盛水,其内侧为密闭的U形面,而桥架则为桁架结构,外侧呈镂空状。这种内实外空、内整外散的断面结构颇为特殊,使得内外刚度特性与传力路径差异显著,呈现各向异性,受力情况也更为复杂,力线与力流走向难以明确界定。

传统渡槽采用桥上架槽的桥槽分离模式,但这样的模式会使槽体加水重的负荷超过本桥的承受能力;马格德堡水桥则采用桥槽合体的外桁架加内加劲壁双层结构,钢用量增加,槽壁受力行为较为复杂^[10]。

从力学传递角度看,水荷载的传递路径可以优化:与其让水先传给槽、再传给桥,不如考虑让水直接传递给桥体结构。这样设计的好处在于:①槽体主要承担盛水和初步传力功能;②桥体作为主要承力结构直接受力;③槽体从繁重的受力任务中解放出来;④整个传力过程更加高效直接。这种思路下,槽体就像力的“快递员”,而桥体则成为真正的“受力终端”,使结构体系更加合理高效。可否能找到一种可分可合、刚柔并济的结构?

笔者观察早餐场景时发现,人们常将塑料袋置于碗中盛装豆腐花——塑料袋仅起承载与传力作用,碗才是主要受力结构,且能瞬时承压。这种塑料膜的特性恰是易变形、快传力且自身受力微小。受此启发,渡槽水桥创新性地在水槽设计成类似塑料膜的波形薄壁钢板结构。

水和桥之间的波形薄壁钢板结构成为传力介质,通过叶摆式支撑板肋将波形板与桥体钢结构相连,使桥与槽虽连为一体,却因刚度差异(桥刚、槽柔)形成若即若离的状态(图7)。而且由于槽不承担主体结构受力,便具备了可更换特性^[13],这与德国马格德堡水桥和三峡升船机水槽完全不同。这种设计带来了多重优势:①槽壁构造大幅简化,无需设置复杂的加劲结构;②显著减少了钢材用量;③实现了结构体

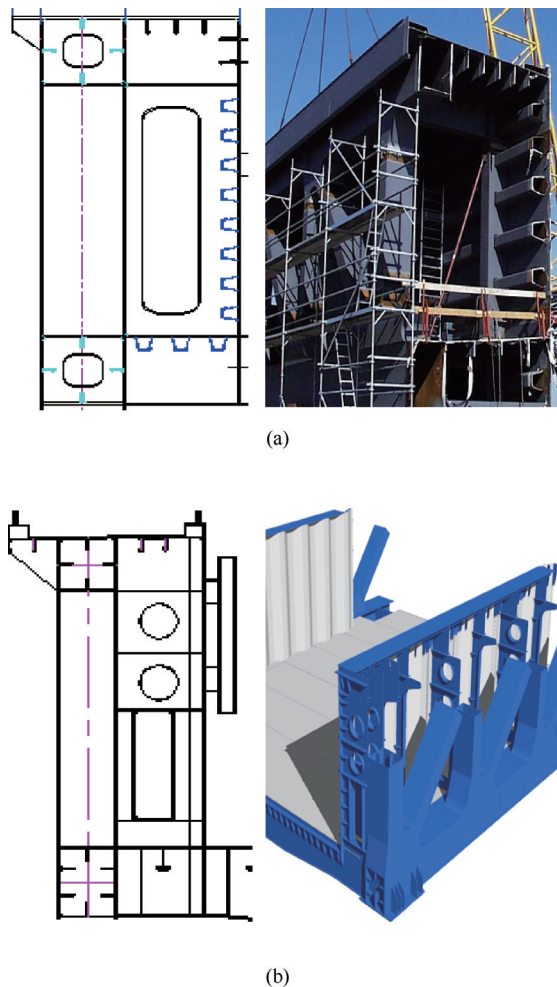


图7 引江济淮通航渡槽水桥槽壁的直板加劲结构示意图(a)和槽壁的波形板结构示意图(b)

Figure 7 Schematic diagrams of the navigable aqueduct's straight stiffened plate (a) and corrugated plate structures (b) in the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge

系与传力机理的创新突破^[7]。

设计灵感源自日常生活智慧,通过借鉴生活中的力学优化机制,将复杂的工程问题转化为常规方案^[14]。正如生活智慧和生物进化都是通过自然选择获得最优解一样,桥梁力学的发展也经历了从传统力线分析到力流理论,最终演化为力云概念的认知过程。在这一过程中,力的方向、作用点及大小三要素始终决定着结构的力学性能。渡槽水桥的设计正是基于这种智慧进化中得来的,通过系统研究力传导机制,优化力的传递路径,运用“借力传导”的力学原理,最终实现了结构性能的显著提升。

2.4 新构件一专多能, 化解超大温差、船撞及共振

渡槽水桥作为承水结构, 其设计需充分考虑水体与钢结构的温差效应。水体相对温度较低, 而且本身热容较大, 温度变化相对缓慢, 而钢结构导热性强, 受环境温度影响显著。江淮地区夏季温差可达 60°C , 水凉钢热这种巨大温差势必会导致钢桥内外表面产生显著的热胀冷缩效应。而渡槽水桥采用了波形薄壁钢板的结构设计, 通过内侧自由伸缩与外侧钢桥的相对独立性, 实现了热胀冷缩的分离, 有效化解了温差带来的结构应力, 显著降低了钢结构疲劳效应, 从而延长桥梁使用寿命。

在通航功能设计上, 槽壁采用柔性波形板结构, 既具备良好的缓冲性能, 又能通过凹凸波形实现局部加劲, 增强抗撞击能力。当船舶意外撞击时, 槽壁的柔性变形可吸收冲击能量, 避免直接传递至主体结构, 形成了既能缓冲不怕撞又能加劲耐撞的韧性能力, 即“柔中带刚”的防护体系, 有效保障桥梁安全。

渡槽水桥需要过水, 桥上承载的2万t水体堪称巨大质量。在特定情况下, 如此庞大的水体若发生晃动, 其产生的惯性将十分惊人; 倘若再与桥梁结构发生共振, 后果更是不堪设想。针对桥上水体的流固耦合效应, 波形板设计通过凹凸结构可以起到散水、碎浪作用, 打乱水流形态, 降低水体晃动频率与桥梁振动的共振风险。试验表明, 波形板相较于传统直平板结构, 在水流晃动控制方面效果显著, 能够有效分散水流能量, 减少水体对桥体的冲击效应。同时通过摩擦摆支座也减小了地震上传, 再通过大质量水体的消

能作用, 可进一步降低上部桥体结构的地震反应。

通过波形板槽壁、摩擦摆支座与水体的协同消能减隔作用, 有效抑制了瞬时结构响应, 提升了结构延性, 降低了钢结构疲劳; 利用桥槽间的刚柔组合特性, 巧妙实现分合离聚效应, 以太极般刚柔并济的手段化解渡槽水流引发的振动、地震及撞击等刚性冲击。新构件兼具“一专多能”特性, 使桥梁整体达到“动静相宜、刚柔并济”的长效服役状态。

当一座桥基本消除了动荷载和温度变化带来的动力效应影响, 仅保留静力效应时, 她便能安静地矗立在那里, 永不疲惫……这种巧妙的设计, 对于未来高抗震地区类似的水桥建设极具借鉴价值。

2.5 因水桥无水定制, 大幅减少施工工期和造价

渡槽水桥采用“先建后挖”的施工策略, 即在未开挖河道的平地上先行建设桥梁主体结构。由于桥墩承台未来将深埋于河道底部, 在江淮膨胀土地区, 若按常规U形河道开挖, 边坡土体受水膨胀后易产生向河道内偏压蠕动, 对桥墩基础稳定性构成威胁。为化解这一难题, 项目团队创新采用W形基坑布局: 通过先期清表形成低边坡, 再利用围堰技术仅开挖两个V形基坑, 河道中部保留土体形成天然“岛屿”。这种设计使每个V形基坑两侧土体压力对称平衡, 在施工早期完成土体蠕变并趋向稳定, 显著减小后期对桥墩基础的影响, 同时避免了复杂边坡支护工程。

由于施工期间河道尚未开挖, 地面保持完整状态, 为桥梁支架搭建提供了稳定基础。利用这一条件, 大幅降低支架高度和用量, 在保障施工安全的同

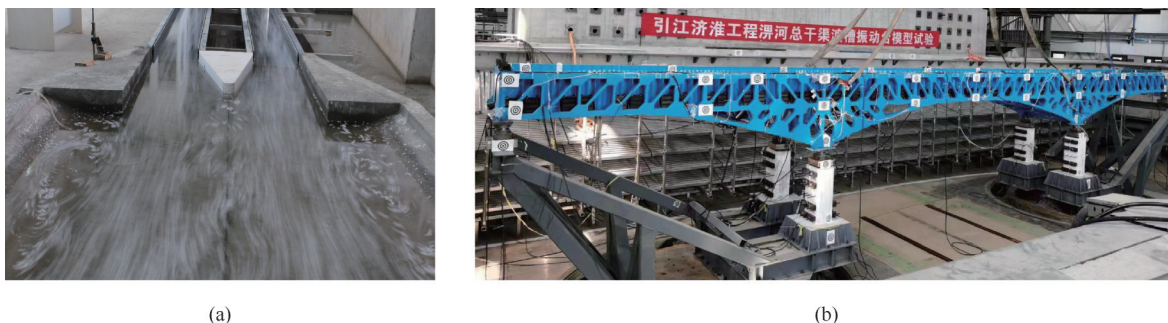


图8 引江济淮通航渡槽水桥渡槽水工试验、振动试验照片

Figure 8 Photographs of hydraulic and vibration tests for the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge Project

时节约了工程造价。此外,充分发挥桥梁结构在无水状态下的受力富余特性,创新采用履带车直接上桥拼装工艺,实现“梁上架梁”,将传统小节段拼装优化为大节段吊装,减少了桥下支架数量和施工工序(图9)。

在施工顺序上,突破常规桥梁“T”字形从主墩向两边对称拼装的模式,采用由两端边跨向主墩、再由主墩向中跨的非对称推进方式。这种类似“订书钉逐个串联”的施工逻辑,极大简化了梁体运输路径,使运梁作业可直接从桥头地面延伸至跨中。该工法省去了栈桥、龙门吊等大型临时设施,完全不受桥下基坑积水影响,工序简单、功效翻倍。经测算,仅此一项创新即可节约工程造价约2000万元。

这种非对称、不平衡的施工方法极为罕见,其采用是基于施工期间桥上一滴水没有的结构受力高度富余这一战略判断,通过战略层面的本质性考量和战术层面的灵活运用,最终形成了本桥特有的施工方法,实现了工程造价的大幅节约。

2.6 渐进式充水试验与后期集中验证

桥梁建成后通常需要通过荷载试验验证结构性能,而常规桥梁的荷载试验往往可在短时间内完成。然而,渡槽水桥作为超量级重载结构,其荷载试验面临特殊挑战。由于建设期间无水状态提供了结构受力富余,施工安全性与精度相对可控,但在荷载试验阶段,瞬时加载相当于桥梁自重两倍的2万t水体,将对桥梁受力和变形产生剧烈冲击,对结构的冲击承受能力和焊缝质量构成严峻考验。因此,本桥的施工过程呈现出“前期架设轻松、后期验证严苛”的特点。

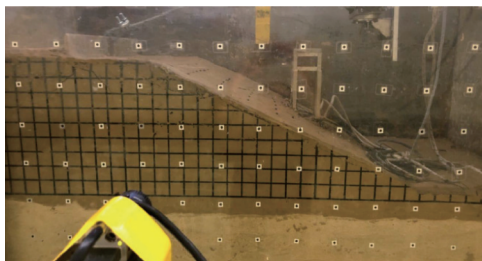
基于这一判断以及无先例可循的现实,充水试验采用渐进式分级加载与卸载方案:通过缓慢分级充水与放水,逐级验证结构性能,同时确保桥梁在加载与卸载过程中保持良好的延性,避免因突然重载引发的冲击效应。整个荷载试验历时20余天,基本是一个少知、未知的探索性试验。

试验依据理论分析结果,制定了基于变形量和延性率的分级加卸载、静停观测方案。通过长时间的探索性验证,试验不仅成功验证了理论计算结果,还深入考察了结构变形量、变形速度指标,即延性率,等关键指标。这种针对超级荷载及其剧烈变化的结构响应研究,不仅为工程技术人员积累了宝贵经验,也为类似超量级桥梁的设计与施工提供了重要参考。试验过程虽漫长,但其探索性价值和对认知极限工况的贡献,充分证明了这一验证方式的必要性。

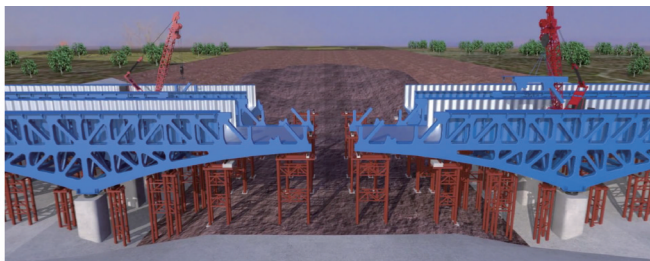
2.7 构建大空间景观,渡槽水桥与立体通航各美其美

虽然渡槽水桥采用了钢结构与拱梁组合体系,但因其承受着4万t的超量级重载,桥梁横向宽度接近50m,竖向最高达16.2m,整个侧面积接近2800m²,确是一个名副其实的“大块头”。鉴于水桥所处的未来江淮运河百里画廊的优美环境,如何将这一庞然大物实现立体化、空间化、景观化与艺术化,也是摆在设计师面前必须解决的命题。

在桥梁的左右分幅设计中,两幅之间设置了分流岛,并将岛头特意设计为船尖造型,使桥面宛如一艘停泊的舰艇,仿佛在水流波纹中逐浪前行;当桥梁合二为一采用梁拱组合时,三条优美的拱肋弧线勾勒出



(a)



(b)

图9 引江济淮通航渡槽水桥工程渡槽土体试验(a)和施工架设示意图(b)

Figure 9 Soil test (a) and construction erection schematic (b) of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge Project



图10 引江济淮通航渡槽水桥渡槽充水试验照片

Figure 10 Photos of the water-filling test for the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge Project

动感轮廓,以柔美的曲线弱化了桥梁的厚重感,增强了整体线条的流畅性。桥梁桁架采用镂空设计,使侧面呈现凹凸层次,配合明暗冷暖的灯光效果,展现出雕梁画栋之美。槽内的波形板设计,于槽内当水流与槽壁接触时,在特定流速下会引发更明显的水波纹,形成粼粼涟漪,在光影映照下愈发美丽。桥体采用深蓝色调,与天水之色相互呼应。未来规划将在分流岛上增设景观监控塔,桥头设置水滴造型的“水玲珑”观景平台,并利用桥内外水位差,通过连通器原理形成自动光影水幕。整座桥梁以水为主题,通过水玲珑、水涟漪和水幕等元素,展现优雅浪漫的设计理念。

渡槽水桥采用逆向重构手法,从体到面、由线及点,通过塑形、雕梁、刻画等工艺,使大体量桥体呈现出空间化与立体感,在端庄稳重之余兼具轻盈动感

与优雅特质^[15]。桥梁之美首重结构,而渡槽水桥尤以新颖设计见长。全桥立体空间融合河谷形态、桥梁结构与水流灵动,既体现磅礴气势又不失婉约韵味,兼具现代风格与古典意境,完美诠释了形神兼备的东方之美。

3 结语

引江济淮通航渡槽水桥作为一座集通水、通航功能于一体的世界级水桥,其设计与建设面临诸多前所未有的技术挑战,包括超量级可变重载、特殊施工条件、宽扁开口断面的侧向刚度控制以及温差效应等复杂问题。针对这些难题,项目团队创新性地提出了“左右分幅、一分为二,上桁下拱、合二为一,上开下合、相克相生,外桁内波、对立统一”的总体概念



图11 引江济淮通航渡槽水桥建成实景图

Figure 11 Completed construction of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge

设计和工程哲学思想,成功解决了桥梁在上下、左右、内外、表里等多维度的结构矛盾,实现了功能与美学的完美统一。

实践表明,通过对复杂问题进行追本溯源、提炼本质,将认知不足的问题进行概念具象化并与经典理论相结合,把未知问题类比生活现象并通过实践探寻规律,再辅以理论计算,就能够有效规避结构复杂性与受力复杂性,从而实现体系的“巧”与结构的“妙”。具体而言:左右分幅设计显著降低了单幅受力等级;梁拱组合结构有效解决了竖向挠度波动问题;波形板的应用实现了传力路径的优化与结构刚柔并济;W形基坑布局和“先建后挖”的施工策略大幅减少了工期和造价;渐进式充水试验验证了理论计算结果并积累了宝贵经验。

渡槽水桥的设计与实践不仅在技术层面实现了创

新突破,更在哲学层面体现了“道法自然,大道至简”的理念。通过将生活现象与工程设计相结合,将对立统一的矛盾转化为和谐共生的整体,成功诠释了中国古典审美与东方工程哲学的融合。这一成果为类似复杂桥梁工程的设计与建设提供了重要参考,也为工程设计中哲学思维的融入提供了实践范例,推动了桥梁工程领域在应对复杂荷载、特殊施工条件等方面的技术进步。

展望未来,随着类似工程的不断推进,建议进一步探索如何在桥梁设计中更广泛地融入哲学思维,以实现结构性能与美学价值的双重提升。同时,针对超量级重载桥梁的长期性能监测与维护,亦需持续开展深入研究,为类似工程的长效服役提供理论支持与实践指导。

参考文献

- [1] 光明网. 引江济淮工程试水通航——长江淮河终“牵手”[EB/OL]. (2023-01-04). <https://m.gmw.cn/baijia/2023-01/04/36276436.html>. Guangming Online. Yangtze River-Huaihe River Water Diversion Project commences trial water supply and navigation: Linking the Yangtze and Huaihe Rivers at last[EB/OL]. (2023-01-04). <https://m.gmw.cn/baijia/2023-01/04/36276436.html>.
- [2] 杨善红,殷亮,余振,等. 引江济淮运河总干渠渡槽桥概念设计[J]. 桥梁建设, 2024, 54(1): 110-116. Yang S H, Yin L, Yu Z, et al. Conceptual design of aqueduct over main navigation channel of Pihe River: A portion of Changjiang River diversion project to feed Huaihe River[J]. Bridge Construction, 2024, 54(1): 110-116.
- [3] 新华社图片. 河上有河!无人机带你鸟瞰世界单跨最大“水上立交”[EB/OL]. (2022-09-23). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1744762339973802685&wfr=spider&for=pc>. Xinhua News Agency Photo. A river above a river! Drone offers aerial view of the world's largest single-span "Aqueduct Interchange" [EB/OL]. (2023-09-23). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1744762339973802685&wfr=spider&for=pc>.
- [4] 大皖新闻. 合肥将建百里画廊和世界水桥景区[EB/OL]. (2023-07-07). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1770761141683241587&wfr=spider&for=pc>. Da Wan News. Hefei to construct "Hundred-Mile Gallery" and World Water Bridge Scenic Area[EB/OL]. (2023-07-07). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1770761141683241587&wfr=spider&for=pc>.
- [5] 中国科学院地质地球所. 工程癌症——膨胀土[EB/OL]. (2021-09-14). https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI4ODc0NjIzNQ==&mid=2247540946&idx=1&sn=df8f01d05a8cbfecad6e97fd9f273e93&chksm=ec3bdf46db4c565071f4a844d9df2be78df5dba20744bc88a855a4cc1a3bc0367fec685f65a9&scene=27. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. The "engineering cancer": Expansive soil[EB/OL]. (2021-09-14). https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI4ODc0NjIzNQ==&mid=2247540946&idx=1&sn=df8f01d05a8cbfecad6e97fd9f273e93&chksm=ec3bdf46db4c565071f4a844d9df2be78df5dba20744bc88a855a4cc1a3bc0367fec685f65a9&scene=27.
- [6] 项海帆,肖汝诚. 桥梁概念设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. Xiang H F, Xiao R C. Conceptual Design of Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [7] 杨善红,洪春林,徐宏光,等. 道法自然,点线人文: 铜黄高速公路工程绿色理念与实践[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(5): 420-429. Yang S H, Hong C L, Xu H G, et al. The Tao way follows nature, the highway stems from culture: The application of green concept in engineering design of Tong-Huang highway[J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(5): 420-429.

- [8] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Liu Y Q. Steel-concrete Hybrid Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [9] Köhler M, Schlaich J. The Magdeburg Water Bridge: Design and construction of a large-scale navigable aqueduct[J]. Structural Engineering International, 2002, 12(3), 164-167.
- [10] 乔珍. 一个智慧的建筑: 走近德国马格德堡水桥[J]. 中华建设, 2012(9): 60-61.
Qiao Z. A smart building: Approaching the Magdeburg water bridge in Germany[J]. China Construction, 2012(9): 60-61.
- [11] 中国长江三峡集团公司. 三峡升船机工程设计总结[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
China Three Gorges Corporation. Design Summary of the Three Gorges Ship Lift Project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [12] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
Li G H. Stability and Vibration of Bridge Structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.
- [13] 徐栋, 尼颖升, 赵瑜. 波形钢板梁桥空间网格分析方法[J]. 土木工程学报, 2015, 48(3): 61-70.
Xu D, Ni Y S, Zhao Y. Analysis method for corrugated steel web beam bridges using spatial grid modelling[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(3): 61-70.
- [14] 凤懋润. 挑战: 桥梁建设工程的哲学思维[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Feng M R. Challenge: Philosophical Thinking of Bridge Construction Project[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [15] 徐利平. 城市桥梁美学创作[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
Xu L P. Aesthetic Creation of Urban Bridges[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2017.

Design Philosophy and Its Application of the Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge

Yang Shanhong

Anhui Comprehensive Transportation Research Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China

Highlights

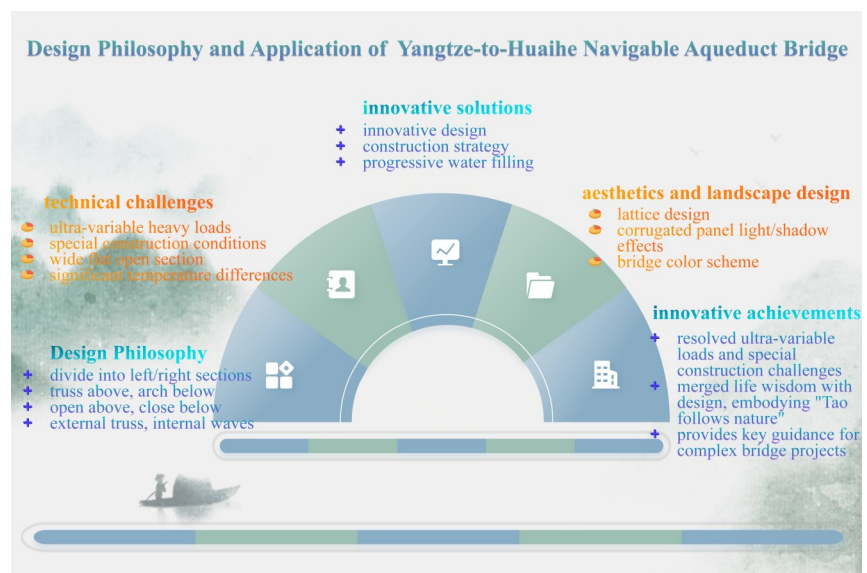
Innovative design overcomes technical challenges, addressing ultra-variable heavy loads.

Optimized construction strategy cuts costs, with reverse construction and progressive testing ensuring efficiency and safety.

Integration of structure and aesthetics achieves functional and aesthetic unity through bionics and philosophical thinking.

Technological innovation enhances sustainability, with features like corrugated plates significantly extending bridge life.

Graphical Abstract



Abstract: The Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge is a world-class water bridge that integrates both water conveyance and navigation functions, and serves as a vertical interchange for two intersecting waterways. The design of this

bridge faces numerous unprecedented technical challenges, including super-variable heavy loads, special construction conditions, lateral stiffness control of wide and flat open sections, and temperature difference effects. To address these challenges, the project team proposed an overall conceptual design and engineering philosophy of "dividing into left and right sections, combining truss above and arch below, opening above and closing below, and integrating external truss with internal waves", which successfully resolved the structural contradictions of the bridge in multiple dimensions and achieved a perfect integration of functionality and aesthetics.

The results show that by simplifying complex problems, visualizing conceptual issues with classical theories, and applying biomimetic principles to unknown problems, combined with theoretical calculations, it is possible to avoid complex structures and forces, thereby achieving a "clever" and "ingenious" system. Specifically, the left-right divided design significantly reduces the load on each section, the truss-arch combined structure effectively addresses vertical deflection issues, the corrugated plate application optimizes the load transfer path and achieves a flexible and rigid structure, the W-shaped pit layout and the "build-first, excavate-later" construction strategy greatly reduce the construction period and cost, and the stepwise water-filling test verifies the theoretical results and accumulates valuable experience.

The design and practice of this bridge not only achieve technical innovation but also reflect the philosophical concept of "following the Dao of nature and simplicity". By integrating everyday phenomena with engineering design and transforming contradictory opposites into a harmonious whole, it successfully interprets the integration of classical Chinese aesthetics and Eastern engineering philosophy. This achievement provides an important reference for the design and construction of similar complex bridge projects and offers a practical example of integrating philosophical thinking into engineering design, promoting technical progress in the bridge engineering field in complex loads and special construction conditions.

In the future, as similar projects continue to advance, it is recommended to further explore how to more widely integrate philosophical thinking and biomimetic principles into bridge design to achieve a dual improvement in structural performance and aesthetic value. Additionally, long-term performance monitoring and maintenance of super-variable heavy load bridges also need to be continuously studied to provide theoretical support and practical guidance for the long-term service of similar projects.

Keywords: conceptual design; engineering design philosophy; super-variable heavy load; aqueduct water bridge; Yangtze-to-Huaihe Navigable Aqueduct Bridge