

墩身吊围栏系统

技术白皮书

标准化、模块化的桥梁墩身检修与安全防护系统方案



公司名称： 浙江宝佳力科技有限公司 / Zhejiang Baojiali Technology Co., Ltd.

发布日期： 2026 年 8 月

文档版本： V1.0

技术领域： 路桥工程 / 施工安全装备 / 模块化钢结构

目录

1. 摘要 (Executive Summary)
2. 行业背景与痛点分析 (Industry Background & Challenges)
3. 产品概述与技术愿景 (Product Overview & Vision)
4. 核心技术架构 (Core Technical Architecture)
5. 关键技术与创新点 (Key Technologies & Innovations)
6. 安全、合规与可用性保障 (Security, Compliance & Reliability)
7. 性能基准与技术数据 (Performance Benchmark)
8. 开放能力与组合能力 (Openness & Combinatorial Flexibility)
9. 典型技术应用场景落地 (Technical Use Cases)
10. 未来技术演进路线 (Future Roadmap)
11. 附录 (Appendix)

1. 摘要 (Executive Summary)

中国交通基础设施建设正持续向高墩、大跨度、跨海跨江方向演进，桥梁墩身附属检修设施的安全标准与安装效率要求同步提升。然而，传统墩身吊围栏长期依赖现场非标焊接与人工放样，存在安装周期长、质量波动大、高空作业风险高、防腐耐久性不足等根本矛盾。

本白皮书旨在介绍浙江宝佳力科技有限公司自主研发的“装配式墩身吊围栏系统”。该系统精准定位于铁路、公路及市政桥梁墩身检修与安全防护场景，通过“工厂全预制 + 模块化螺栓装配 + 标准化模数体系”的核心理念，取代传统现场非标焊接模式。系统采用 Q235B 碳素结构钢主体、G325/40/50S 钢格板步板、M20 8.8 级高强螺栓连接、多元素粉末共渗+钝化+封闭防腐体系（Q/CR 749.3-2020 第 1 套），吊篮支架静活载达 4.0 kN/m²。

经多个高铁及城际铁路项目实践验证，该系统将单墩安装周期从传统的 3~5 天缩短至 1~2 天，现场焊接量减少 80%以上，构件尺寸公差控制在 ± 1.5 mm 以内，防腐设计寿命较传统热浸锌提升约 40%，为桥梁建设单位实现了“省事、省心、省钱”的全周期价值。

2. 行业背景与痛点分析 (Industry Background & Challenges)

2.1 应用场景现状

桥梁墩身吊围栏（含墩顶吊篮、检查梯、钢格板平台及防护栏杆）是桥梁墩台附属钢结构的核心组成部分，沿桥墩四周对称布置，为桥梁运营期墩身检查、维护、保养提供安全作业通道和操作平台。

在当前中国交通基建场景中，吊围栏面临以下客观要求：

- **高墩大跨趋势：**跨海跨江桥梁、高速铁路高架桥墩身高度持续增加，部分桥墩高度超过 80 m，对吊围栏的结构稳定性和防腐耐久性提出更高要求。
- **安全标准趋严：**《建筑施工高处作业安全技术规范》（JGJ 80-2016）、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》（TB 10415-2018）等规范对高处作业防护、栏杆高度、步板固定等均有明确强制性要求。
- **工期压力增大：**重大基建项目普遍采用平行作业、流水施工模式，吊围栏作为附属工程往往被压缩在主体结构完工后的短窗口内完成，安装效率直接影响项目总工期。
- **全生命周期成本意识提升：**业主单位从关注初期采购成本转向关注 30~50 年运营期的维护成本，对吊围栏的防腐耐久性、可更换性提出更高要求。

2.2 传统方案的核心痛点

痛点一：现场非标焊接，质量不可控

传统吊围栏多采用现场放样、现场切割、现场焊接的非标制作模式。角钢支架、栏杆圆钢、步板支撑等均在墩顶或临时平台上手工焊接，焊缝质量受焊工技术水平、现场天气条件影响显著，焊缝尺寸偏差大、外观质量不稳定，难以满足《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205-2020）对焊缝外观和尺寸的统一要求。同一项目不同墩位的吊围栏质量差异明显，监理验收通过率不稳定。

痛点二：安装周期长，高空作业风险高

传统现场焊接式吊围栏单墩安装通常需要 3~5 天，期间作业人员长时间在墩顶高空环境下进行切割、焊接、矫正作业。高空焊接作业存在触电、火灾、物体打击等多重安全风险，且焊接弧光和烟尘对作业人员健康造成影响。工期越长，高空作业暴露时间越久，安全事故概率越高。

痛点三：防腐耐久性不足，维护成本高

传统吊围栏多采用普通热浸锌防腐处理，锌层厚度约 65~85 μm ，在沿海、化工区等 C4~C5 腐蚀环境下，通常 5~8 年即出现锈蚀，需要频繁维护补漆。现场焊接部位的焊后补漆质量更难保证，往往成为腐蚀起始点。运营期维护需要搭建临时作业平台，单次维护成本高，且影响桥梁正常运营。

痛点四：材料浪费严重，综合成本高

现场非标制作模式下，角钢下料尺寸凭经验估算，切割余量偏大，材料损耗率通常在 8%~12%。现场焊接产生的边角料难以回收利用，且返工率较高。此外，现场需要配备电焊机、切割机、气瓶等大量设备，设备进出场和租赁成本增加了项目综合成本。

痛点五：标准化程度低，难以规模化复制

传统吊围栏每个项目、每个墩型都需要重新设计、重新放样，缺乏统一的模数体系和标准构件库。构件之间的互换性差，一个项目的剩余构件难以在其他项目复用，造成库存积压和资源浪费。同时，非标产品难以通过自动化生产线实现规模化制造，生产成本居高不下。

3. 产品概述与技术愿景 (Product Overview & Vision)

3.1 产品定位

针对上述行业痛点，浙江宝佳力科技有限公司推出了“装配式墩身吊围栏系统”（以下简称“本系统”）。该系统精准定位于铁路、公路及市政桥梁墩身检修与安全防护场景的标准化附属钢结构产品，旨在通过“工厂全预制 + 模块化螺栓装配 + 标准化模数体系”的核心理念，取代传统现场非标焊接模式。

本系统一体化整合了墩顶吊篮（含直线段与圆弧段）、墩身检查梯、钢格板步板、防护栏杆、爬梯平台及预埋件系统六大功能模块，所有构件均在工厂完成下料、焊接、涂装和质检，现场仅需螺栓装配和少量补焊，实现“工厂制造、现场拼装”的工业化转型。

3.2 技术愿景

让桥梁附属钢结构如工业制造般精准、安全、高效。

本系统以标准化模数为基础，以工厂预制为手段，以螺栓装配为路径，推动桥梁墩身吊围栏从“工地作坊式生产”向“工厂工业化制造”转型，实现产品质量的一致性、安装效率的跨越式提升和全生命周期成本的显著降低。

3.3 价值主张

通过力学优化的结构设计、统一的规格模数体系和工厂级的质量管控，本系统实现了“质量稳定性”与“安装效率”的双重飞跃：

- **质量稳定：**工厂数控切割、机器人焊接、全自动涂装，构件尺寸公差 $\pm 1.5\text{ mm}$ ，焊接一次合格率 $\geq 99\%$ 。
- **安装高效：**单墩安装周期从3~5天缩短至1~2天，现场焊接量减少80%以上。
- **防腐耐久：**多元素粉末共渗+钝化+封闭体系，总干膜 $\geq 70\text{ }\mu\text{m}$ ，设计寿命较传统热浸锌提升约40%。
- **成本节约：**材料损耗率从8%~12%降至3%以内，综合成本较传统方案降低约15%~20%。

最终为客户践行浙江宝佳力“省事、省心、省钱”的经营理念。

4. 核心技术架构 (Core Technical Architecture)

4.1 系统组成清单 (Bill of Materials)

本系统由六大功能模块组成，核心部件清单如下：

NO.	部件/模块名称	规格/型号/参数
1	支架水平角钢	$\angle 63 \times 63 \times 6$, Q235B
2	支架竖向角钢	$\angle 75 \times 75 \times 8$, Q235B
3	支架斜撑角钢	$\angle 63 \times 63 \times 6$, Q235B
4	挂板角钢	$\angle 75 \times 75 \times 6$, Q235B
5	大规格水平角钢	$\angle 100 \times 63 \times 6$, Q235B (大墩型用)
6	栏杆圆钢	$\Phi 16$, HPB300
7	预埋U型钢筋	$\Phi 20$, HPB300
8	预埋L型钢筋/套筒	$\Phi 20$ HPB300 / $\Phi 40 \times 200$ 35号钢
9	钢格板步板	G325/40/50S, 符合 YB/T 4001.1-2019
10	化学锚栓 (后锚固法)	M20 特殊倒锥形胶粘型, 8.8级
11	连接螺栓	M20 $\times$ 70, 8.8级, 符合 GB/T 3098.1-2010
12	栏杆螺栓	M16 双螺母+平垫圈+弹簧垫圈
13	橡胶垫块	100 $\times$ 100 $\times$ 10 / 40 $\times$ 40 $\times$ 5
14	楔形钢垫板	按加工 (圆弧段调整用)
15	圆弧段防护钢筋网	$\Phi 10$, HPB300, 网格间距 $\leq 100\text{ mm}$
16	检查梯组件	含爬梯、平台、扶手, Q235B+HPB300

4.2 核心材料选型与加强设计

4.2.1 主体结构材料

本系统主体结构采用 Q235B 碳素结构钢，执行《碳素结构钢》（GB/T 700-2006）标准。Q235B 屈服强度 ≥ 235 MPa，抗拉强度 370~500 MPa，伸长率 $\geq 26\%$ ，具有良好的塑性、韧性和焊接性能，是桥梁附属钢结构的主流选材。

选型依据：

- 吊围栏支架承受的静活载为 4.0 kN/m²，属于轻载结构，Q235B 的强度储备充足。
- Q235B 焊接性能优良，碳当量 $\leq 0.45\%$ ，无需预热即可焊接，适合工厂自动化焊接。
- Q235B 市场供应充足，价格稳定，有利于控制成本和保障交付周期。

4.2.2 关键受力加强设计

- **竖向支架：**采用 $\angle 75 \times 75 \times 8$ 等边角钢，截面面积 11.503 cm²，截面模量 15.71 cm³，较水平支架（ $\angle 63 \times 63 \times 6$ ）截面模量提升约 96%，确保竖向承载和稳定性。
- **斜撑体系：**每榀支架设置 $\angle 63 \times 63 \times 6$ 斜撑，形成三角形稳定结构，有效抵抗水平荷载（风荷载、人员倚靠力）。
- **圆弧段加强：**圆端形墩圆弧段支架沿顶帽弧径向布置，非同圆心引起的倾斜角度采用楔形橡皮垫板调整，确保支架与墩身密贴传力。
- **步板支撑：**钢格板步板与环向角钢搭接长度 ≥ 40 mm，每块步板不少于 2 个安装夹固定，确保步板在集中荷载下不发生翘曲和滑移。

4.2.3 防腐材料体系

本系统采用《铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第 3 部分：附属钢结构》（Q/CR 749.3-2020）第 1 套涂装体系：多元素粉末共渗 + 钝化 + 封闭处理，总干膜最小厚度 ≥ 70 μ m，适用于 C1~C5 腐蚀环境。

该体系较传统热浸锌的优势：

- 多元素粉末共渗层与基体形成冶金结合，附着力优于纯锌层，不易剥落。
- 钝化+封闭双重处理，封堵涂层微孔，耐盐雾性能显著提升。
- 复合防腐层在工厂完成，质量可控性远高于现场补漆。

4.3 标准化模数体系

本系统的核心设计哲学是：用尽量少的基础标准模块，组合出尽量多的场景适配。

4.3.1 基础模数

- **支架间距模数：**直段支架标准间距 630 mm（配合 550 mm 宽检查梯设置），可按墩型尺寸微调为 600~700 mm。
- **步板模数：**标准步板类型 I（837×603 mm）和类型 II（1102×450 mm），通过两种步板的组合适配不同墩型周长。
- **角钢模数：**水平支架统一∠63×63×6，竖向支架统一∠75×75×8，全系统仅两种主力角钢规格。

4.3.2 模块组合方式

- **平面组合：**通过直段标准支架 + 圆弧段定制支架的组合，适配圆形墩、圆端形墩、矩形墩（含一侧收坡等高墩）等多种墩型。
- **垂直扩展：**检查梯采用标准节段堆叠方式，每节高度 1.5~2.0 m，通过法兰螺栓连接，可适配不同墩身高度。
- **横向扩展：**吊篮宽度标准 630 mm，可通过调整挂板长度适配 600~800 mm 宽度需求。

4.3.3 连接方式

- **支架与预埋件：**M20×70 螺栓（8.8 级）与预埋套筒连接，连接长度≥30 mm，双螺母防松。
- **支架构件间：**工厂焊接为主（端支架组件整体焊接出厂），现场仅需螺栓连接。
- **步板与支架：**专用安装夹卡扣连接，每块步板≥2 个安装夹，螺栓力矩 30~40 N·m。
- **栏杆与立柱：**Φ16 圆钢穿入立柱预留孔，双螺母固定，力矩≥30 N·m。

4.4 场景自适应体系

本系统通过标准化模块 + 扩展接口 + 配件体系覆盖不同工况：

- **墩型适配：**平头墩（4.3×2.6 m、5.4×3.6 m 等）、圆端形墩、矩形墩（含收坡墩），通过圆弧段支架弧度定制和直段支架数量调整实现适配。
- **墩高适配：**检查梯标准节段堆叠，可覆盖 10~80 m 墩高范围。
- **腐蚀环境适配：**标准配置 Q/CR 749.3-2020 第 1 套体系（C1~C5），重腐蚀环境（沿海、化工区）可升级为第 2 套体系或增加涂层厚度。

- **固定方式适配：**新建桥梁采用预埋 U 型钢筋+L 型套筒固定法；已完工桥梁增设吊围栏采用 M20 化学锚栓后锚固法。

[架构示意图占位：系统模块分解与组合关系图]

5. 关键技术与创新点 (Key Technologies & Innovations)

5.1 创新点一：工厂全预制的模块化螺栓装配技术

传统做法：传统吊围栏采用现场放样、现场切割、现场焊接的非标制作模式，所有构件在墩顶高空环境下手工加工和焊接，单墩安装周期 3~5 天，现场焊接量大，质量受人为因素影响显著。

本产品做法：本系统所有构件（角钢支架、步板、栏杆、检查梯节段）均在工厂完成数控下料、机器人焊接、全自动涂装和出厂质检，形成标准化预制组件。现场仅需将预制组件通过 M20 高强螺栓与预埋件连接固定，步板用安装夹卡扣固定，栏杆穿入预留孔用螺母固定，现场焊接量减少 80% 以上，仅圆弧段钢筋网和端栏杆连接处需少量现场补焊。

量化效益：

- 单墩安装周期从 3~5 天缩短至 1~2 天，安装效率提升约 60%~70%。
- 现场焊接量减少 80% 以上，高空焊接作业时间大幅缩短，安全风险显著降低。
- 构件尺寸公差从现场制作的 $\pm 5 \sim 10$ mm 提升至工厂预制的 ± 1.5 mm，安装精度提升约 70%。
- 现场作业人员从传统的 6~8 人减少至 3~4 人，人力成本降低约 50%。

5.2 创新点二：双模数标准化构件体系

传统做法：传统吊围栏每个项目、每个墩型都需要重新设计和放样，角钢下料尺寸凭经验估算，构件之间缺乏互换性，一个项目的剩余构件难以在其他项目复用，材料损耗率高达 8%~12%。

本产品做法：本系统建立了“支架间距模数（630 mm）+ 步板模数（类型 I 837×603 mm / 类型 II 1102×450 mm）”的双模数标准化体系。全系统仅两种主力角钢规格（ $\angle 63 \times 63 \times 6$ 水平支架、 $\angle 75 \times 75 \times 8$ 竖向支架），通过标准支架数量调整和两种步板组合，适配不同墩型周长和尺寸。所有构件按统一模数生产，具备跨项目互换性。

量化效益：

- 材料损耗率从 8%~12%降至 3%以内，材料利用率提升约 60%。
- 构件跨项目复用率从传统的不足 10%提升至 60%以上，减少库存积压。
- 工厂可实现批量备料和标准化生产，生产效率提升约 40%，交付周期缩短约 30%。
- 全系统主力角钢规格从传统的 5~8 种减少至 2 种，采购和库存管理成本显著降低。

5.3 创新点三：多元素粉末共渗复合防腐体系

传统做法：传统吊围栏多采用普通热浸锌防腐处理，锌层厚度约 65~85 μm ，在 C4~C5 腐蚀环境下 5~8 年即出现锈蚀。现场焊接部位的焊后补漆质量难以保证，往往成为腐蚀起始点，运营期维护成本高。

本产品做法：本系统采用 Q/CR 749.3-2020 第 1 套涂装体系——多元素粉末共渗 + 钝化 + 封闭处理，总干膜厚度 $\geq 70 \mu\text{m}$ 。多元素粉末共渗层与钢基体形成冶金结合（而非物理覆盖），涂层附着力显著优于纯锌层；钝化处理在共渗层表面形成致密钝化膜，封堵微孔；封闭处理进一步填充表面微裂纹，形成三重防护。所有防腐处理在工厂完成，现场仅需对少量焊接部位按原体系补漆。

量化效益：

- 防腐设计寿命从传统热浸锌的 5~8 年提升至 8~12 年，设计寿命提升约 40%~50%。
- 涂层附着力（划格法）从传统热浸锌的 2~3 级提升至 1 级（无剥落）。
- 运营期维护频次从每 5 年一次降至每 8~10 年一次，全生命周期维护成本降低约 30%~40%。
- 现场补漆面积从传统的 20%~30%降至 5%以内，补漆质量可控性大幅提升。

5.4 创新点四：预埋套筒+橡胶垫块密贴传力技术

传统做法：传统吊围栏支架与墩身连接多采用预埋 U 型螺栓直接固定，由于墩身混凝土表面存在平整度偏差（通常 $\pm 5 \sim 10 \text{ mm}$ ），支架与墩身之间存在间隙，导致支架受力不均、局部应力集中，长期使用后易出现螺栓松动和支架变形。

本产品做法：本系统采用“预埋 L 型套筒（ $\Phi 40 \times 200$ ，35 号钢）+ M20 螺栓连接 + 橡胶垫块密贴”的传力技术。预埋套筒外缘与结构轮廓线齐平，确保连接面平整；支架与墩身结合部设置 $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}$ 或 $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}$ 橡胶垫块，填充支架与墩身之间的间隙，保证支架与墩身表面密贴传力；圆弧段因非同心圆引起的倾斜角度采用楔形橡皮垫板调整。

量化效益:

- 支架与墩身间隙从传统的 2~5 mm 降至 ≤ 2 mm (橡胶垫填充后), 密贴度提升约 60%。
- 螺栓受力均匀性提升, 单根螺栓载荷偏差从传统的 $\pm 30\%$ 降至 $\pm 10\%$ 以内。
- 支架变形量从传统的 3~5 mm 降至 1~2 mm, 结构稳定性提升约 50%。
- 橡胶垫块同时起到减震缓冲作用, 降低列车通过时振动对支架连接的疲劳影响。

5.5 创新点五：双固定方式兼容设计

传统做法: 传统吊围栏通常仅支持预埋固定一种方式, 适用于新建桥梁。对于已完工桥梁需要增设或更换吊围栏的场景, 传统产品无法适配, 需要采用膨胀螺栓等临时固定方式, 安全性和耐久性难以保证。

本产品做法: 本系统同时支持两种固定方式, 实现新建与改建场景全覆盖:

- **预埋固定法 (推荐):** 新建桥梁在墩身/墩顶混凝土浇筑前预埋 U 型钢筋和 L 型套筒, 支架通过 M20 螺栓与套筒连接, 连接强度高, 耐久性好。
- **后锚固法 (化学锚栓):** 已完工桥梁增设吊围栏时, 采用 M20 特殊倒锥形胶粘型锚栓 (8.8 级), 钻孔清孔后注入植筋胶, 插入锚栓养生 24 h, 经抗拔力试验合格后安装支架。

量化效益:

- 产品适用场景从仅新建桥梁扩展至新建+改建+维修全场景, 市场覆盖范围提升约 50%。
- 后锚固法单锚栓抗拉承载力 ≥ 97.9 kN (M20 8.8 级), 安全系数 ≥ 2.0 , 满足结构安全要求。
- 改建项目无需破坏原有墩身结构, 施工对桥梁运营影响最小化。

6. 安全、合规与可用性保障 (Security, Compliance & Reliability)

6.1 核心安全与可靠性指标

指标	参数	验证手段
吊篮支架静活载	4.0 kN/m ²	有限元分析 + 现场静载试验
墩顶悬臂板竖向集中荷载	1.5 kN	有限元分析
防护栏杆高度	≥ 1100 mm	设计规范 + 出厂检验

步板集中荷载承载力	≥1.5 kN（单点）	钢格板荷载试验（YB/T 4001.1）
螺栓连接安全系数	≥2.0	力学计算 + 抗拔力试验
支架最大挠度	≤L/250（L 为支架跨度）	有限元分析
防腐设计寿命	8~12 年（C1~C5 环境）	盐雾试验 + Q/CR 749.3 检测
焊接一次合格率	≥99%	工厂焊缝探伤 + 外观检查
构件尺寸公差	±1.5 mm	出厂三坐标检测

经有限元分析验证，在 4.0 kN/m² 均布活载作用下，水平角钢∠63×63×6 最大弯曲应力 23.8 N/mm²（远低于 Q235B 抗弯强度设计值 215 N/mm²），最大挠度 0.04 mm（远低于 L/250=2.52 mm）；竖向角钢∠75×75×8 稳定应力 2.48 N/mm²，长细比 43.7（远低于容许长细比 150）；预埋 U 型钢筋 Φ20 抗拔安全系数 67.3；化学锚栓 M20 抗拉安全系数 77.7。结构安全储备充足。

6.2 全流程保障机制

6.2.1 设计阶段

- 用户需求调研：针对每个项目的墩型参数、腐蚀环境、固定方式进行专项调研。
- 3D 建模与仿真：采用三维建模软件进行参数化设计，对关键受力节点进行有限元分析。
- 设计评审：结构工程师、工艺工程师、质量工程师联合评审，确保设计可制造、可安装、可维护。

6.2.2 制造阶段

- 数控下料：采用数控切割机进行角钢下料，切口平整无毛刺，尺寸精度±0.5 mm。
- 机器人焊接：端支架组件采用机器人自动焊接，焊缝尺寸均匀，焊接参数可追溯，焊接一次合格率≥99%。
- 全自动涂装：多元素粉末共渗+钝化+封闭处理在全自动涂装线完成，涂层厚度均匀可控，每批产品抽检涂层厚度。
- 工装夹具：采用专用焊接工装和组装夹具，确保构件尺寸一致性和互换性。

6.2.3 出厂检验

- 外观检查：100%目视检查焊缝外观、涂层外观、构件变形。
- 尺寸检测：每批抽检 10%构件进行三坐标尺寸检测，关键尺寸 100%检测。
- 涂层检测：每批产品用磁性测厚仪抽检涂层厚度（每构件测≥5 点），总干膜≥70 μm。
- 焊缝探伤：关键受力焊缝按比例进行超声波探伤（UT），II 级合格。

- 出厂合格证：每批产品出具产品合格证、材质证明文件、涂层检测报告。

6.2.4 安装阶段

- 安装指导：提供详细的《墩身吊围栏安装说明书》，并可派技术人员现场指导首次安装。
- 安装培训：对安装班组进行技术交底和安全交底，确保安装人员掌握操作要点。
- 过程检查：安装过程中按工序进行质量检查（预埋件检查→支架安装检查→步板检查→栏杆检查→螺栓力矩检查）。
- 验收交付：安装完成后进行全面自检，合格后报监理验收，签署验收记录。

6.2.5 运营阶段

- 维护手册：提供《维护保养手册》，明确日常检查、定期维护、特殊情况检查的内容和周期。
- 技术支持：提供终身技术咨询服务，协助业主解决运营期维护问题。
- 备件供应：建立标准构件备件库，可快速供应更换构件。

6.3 合规标准与质量控制

本系统设计、制造、安装、验收执行以下标准：

国家标准：

1. GB/T 700-2006《碳素结构钢》
2. GB 50017-2017《钢结构设计标准》
3. GB 50205-2020《钢结构工程施工质量验收标准》
4. GB 50661-2011《钢结构焊接规范》
5. GB/T 3098.1-2010《紧固件 螺栓、螺钉和螺柱的机械性能》
6. GB/T 1499.1-2017《钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋》
7. JGJ 80-2016《建筑施工高处作业安全技术规范》
8. JGJ 59-2011《建筑施工安全检查标准》

行业标准：

9. TB 10002-2017《铁路桥涵设计规范》
10. TB 10091-2017《铁路桥梁钢结构设计规范》

11. TB 10415-2018《铁路桥涵工程施工质量验收标准》
12. Q/CR 749.3-2020《铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第3部分：附属钢结构》
13. JTG/T 3650-2020《公路桥涵施工技术规范》
14. JTG F80/1-2017《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》
15. YB/T 4001.1-2019《钢格栅板及配套件 第1部分：钢格栅板》

本系统彻底改变了以往吊围栏“现场作坊式生产、质量凭经验把控”的落后局面，通过工厂级的标准化制造和全流程质量管控，实现了产品质量的一致性和可追溯性。

7. 性能基准与技术数据 (Performance Benchmark)

下表在同等工况（单墩、平头墩 4.3×2.6 m、吊篮宽度 630 mm、C3 腐蚀环境）下，将本系统与两种传统方案进行对比：传统方案 A 为现场非标焊接式吊篮（行业主流做法），传统方案 B 为简易角钢围栏（低端替代方案）。

技术/经济指标	传统方案 A（现场焊接式）	传统方案 B（简易角钢围栏）	本系统（宝佳力装配式）	技术突破效益
主体材质	Q235B，现场下料	Q235B，规格混杂	Q235B，工厂数控下料	材料统一，质量可控
单墩钢料用量	约 1100~1200 kg	约 900~1000 kg	约 1027 kg	用量精准，损耗低
材料损耗率	8%~12%	10%~15%	≤3%	损耗降低约 60%~75%
构件尺寸公差	±5~10 mm	±10~15 mm	±1.5 mm	精度提升约 70%~85%
焊接一次合格率	85%~90%	75%~85%	≥99%	合格率提升约 10%~15%
单墩安装周期	3~5 天	2~3 天	1~2 天	周期缩短约 60%~70%
现场焊接量	100%（全现场焊）	100%	≤20%	现场焊接减少 80%+
现场作业人员	6~8 人	4~6 人	3~4 人	人力减少约 50%
防腐体系	普通热浸锌，65~85 μm	刷漆/简易镀锌，40~60 μm	多元共渗+钝化+封闭，≥70 μm	设计寿命提升约 40%~50%
防腐设计寿命	5~8 年	3~5 年	8~12 年	寿命延长约 40%~60%
支架与墩身密贴度	间隙 2~5 mm	间隙 3~8 mm	间隙≤2 mm（橡胶垫填充）	密贴度提升约 60%
螺栓连接方式	预埋 U 型螺栓，单螺母	膨胀螺栓/焊接	预埋套筒+M20 双螺母 / 化学锚栓	连接可靠，防松
步板固定方式	焊接固定	铁丝绑扎/点焊	安装夹卡扣，≥2 个/块	可拆卸，更换方便

构件互换性	无（每墩定制）	无	有（双模数标准体系）	跨项目复用率 ≥60%
初期综合成本	100%（基准）	70%~80%	85%~90%	初期成本略高于低端方案
全生命周期成本（30年）	100%（基准）	130%~150%（维护频繁）	75%~80%	全周期成本降低约20%~25%

说明：

- 传统方案 A 数据来源于行业调研及多个高铁项目的传统吊围栏施工记录。
- 传统方案 B 数据来源于低端市场简易角钢围栏产品调研。
- 本系统数据来源于浙江宝佳力已交付项目的实际统计及工厂检测数据。
- 全生命周期成本包含初期采购成本、安装成本、30 年运营期维护成本（按防腐寿命周期折算）。

8. 开放能力与组合能力（Openness & Combinatorial Flexibility）

8.1 配置与拓扑灵活性

本系统通过标准化模块的组合，可形成多种形态：

- **全围式吊篮：**沿桥墩四周全封闭布置，适用于大多数矩形墩、圆端形墩，提供 360° 检修通道。
- **半围式吊篮：**仅沿桥墩两侧或三侧布置，适用于桥台、相邻墩距较小的场景，降低材料用量。
- **高低侧吊篮：**沿桥墩高低侧各设踏步或检查梯一处，适用于有坡度的墩顶或异形墩。
- **连体扩展吊篮：**多个桥墩吊篮通过连廊连接，适用于双柱墩、门式墩等多柱结构，形成连续检修通道。
- **检查梯+吊篮组合：**固定支座墩设置检查梯，配合吊篮形成“上下通行+四周检修”的完整系统。

8.2 多场景与多规模适配

本系统覆盖以下典型场景与规格跨度：

场景维度	覆盖范围
墩型	圆形墩、圆端形墩、矩形墩、平头墩、收坡墩、双柱墩
墩顶尺寸	最小 3.0×2.0 m，最大 8.0×4.0 m（可按参数表扩展）
墩身高度	10~80 m（检查梯标准节段堆叠）
桥梁类型	高速铁路、城际铁路、公路桥梁、市政桥梁、跨海跨江桥梁
腐蚀环境	C1~C5（标准配置），重腐蚀环境可升级
固定方式	预埋固定法（新建）、化学锚栓后锚固法（改建）
吊篮宽度	600~800 mm（标准 630 mm）

8.3 生态集成与协同

本系统可与桥梁建设上下游主流装备和体系兼容协同：

- **与施工装备协同：**吊篮构件重量适中（单榀支架约 15~25 kg），可配合 25 t 汽车吊、登高车、施工电梯等常规装备进行安装，无需专用大型设备。
- **与模板体系协同：**预埋件系统可与墩身模板体系集成，预埋套筒定位固定在模板上，混凝土浇筑后预埋件位置精准。
- **与 BIM 体系协同：**产品支持 BIM 参数化建模，可将吊围栏模型集成到桥梁 BIM 模型中，实现碰撞检查和工程量自动统计。
- **与运维体系协同：**标准化构件和可拆卸步板设计，便于运营期维护更换；可预留传感器安装接口，拓展智能化监测能力。
- **与宝佳力产品体系协同：**本系统可与浙江宝佳力安全梯笼、盖梁平台、墩身围笼、防落梁挡块等产品组合使用，形成桥梁下构施工与运维全周期防护解决方案。

9. 典型技术应用场景落地（Technical Use Cases）

9.1 场景一：宁波至慈溪市域（郊）铁路工程

项目概况：宁波至慈溪市域（郊）铁路工程龙山站~龙山隧道（含）区间，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司设计，工程设计综合甲级资质。该区间桥梁附属及预埋件施工图（B5 版）包含墩顶吊篮、检查梯、钢格板平台、爬梯平台等附属结构。

产品配置：

- 墩型：平头墩 4.3×2.6 m 和 5.4×3.6 m 两种
- 吊篮支架：∠63×63×6 水平角钢 + ∠75×75×8 竖向角钢，Q235B
- 步板：G325/40/50S 钢格板，符合 YB/T 4001.1-2019
- 固定方式：预埋 U 型钢筋+L 型套筒，M20 化学锚栓备用
- 防腐：Q/CR 749.3-2020 第 1 套体系（多元素粉末共渗+钝化+封闭）
- 单墩钢料：约 1027.55 kg

应用效果：所有构件工厂预制，现场螺栓装配，单墩安装 1.5 天完成，较传统方案缩短约 60%。预埋件位置偏差≤8 mm，支架与墩身密贴度良好，涂层厚度检测全部≥70 μm，监理验收一次通过。

[应用场景照片占位：宁波至慈溪项目墩顶吊篮安装完成实景]

9.2 场景二：金华枢纽沪昆线双 48 m 连续梁

项目概况：金华枢纽沪昆线双 48 m 连续梁墩身吊围栏工程，图纸编号 JHKRZQSG03-D04。该项目为连续梁桥墩，墩型为矩形一侧收坡等高墩，墩顶尺寸 7.0×3.0 m，墩底尺寸 5.2×3.4 m。

产品配置：

- 墩型：矩形一侧收坡等高墩
- 支架：∠75×75×8 立柱角钢 + ∠63×63×6 斜撑角钢 + ∠75×75×6 挂板角钢，Q235-B.Z
- 固定方式：预埋 U 型钢筋+L 型钢筋（套筒），L 型套筒外缘与结构轮廓线齐平
- 密贴处理：角钢支架与帽结合部设置橡胶垫块（100×100×10 / 40×40×5）
- 步板：类型 I 837×603 mm（12 块）+ 类型 II 1102×450 mm（2 块），卡扣固定
- 防腐：多元素粉末共渗+钝化+封闭，符合 Q/CR 749.3-2020
- 单墩钢料：约 1812.9 kg

应用效果：收坡墩圆弧段通过楔形橡皮垫板调整倾斜角度，支架与墩身密贴传力。直段支架间距 630 mm，步板铺设平整，栏杆平直度≤5 mm/10 m。螺栓终拧力矩全部达标，无漏拧。

[应用场景照片占位：金华枢纽项目双 48 连续梁墩身吊围栏实景]

9.3 场景三：杭绍台高速铁路

项目概况：杭绍台高铁是浙江省首条民营控股高铁，线路全长 266.9 km，设计时速 350 km/h。沿线桥梁墩身数量众多，墩型以圆端形墩和矩形墩为主。

产品配置：安全梯笼、墩身围笼、装配式围挡、墩顶吊围栏、护栏网片全品类供货。其中墩顶吊围栏采用本系统标准配置，适配多种墩型。

应用效果：标准化模数体系实现了不同墩型之间的构件互换，项目剩余构件可在后续标段复用，材料损耗率控制在 3%以内。工厂预制+现场装配模式有效保障了高铁项目紧张的工期要求。

9.4 场景四：杭州湾跨海铁路大桥（超级工程）

项目概况：杭州湾跨海铁路大桥是通苏嘉甬高铁核心控制性工程，世界在建最长跨海高速铁路桥，长三角一体化标志性工程。海洋环境腐蚀等级 C5~C5-M，对吊围栏防腐性能要求极高。

产品配置：安全梯笼、盖梁平台、墩身作业平台、挂篮防护、护栏网片。墩顶吊围栏采用升级防腐配置（Q/CR 749.3-2020 第 1 套体系+额外封闭层），总干膜厚度 $\geq 90 \mu\text{m}$ 。

应用效果：多元素粉末共渗复合防腐体系在海洋高盐雾环境下表现优异，涂层附着力 1 级（无剥落），耐盐雾性能满足 C5-M 环境要求。标准化安装模式适应了跨海大桥海上施工窗口短、作业条件恶劣的特点。

[应用场景照片占位：杭州湾跨海铁路大桥墩身作业平台实景]

10. 未来技术演进路线（Future Roadmap）

10.1 近中期（12 个月内）—— 材质轻量化与智能化监测

方向一：高强度钢轻量化：在 Q235B 基础上，引入 Q355B 低合金高强度结构钢用于大墩型和高墩型吊围栏的竖向支架和斜撑。在保证同等承载能力的前提下，构件截面可减小约 15%~20%，单墩自重降低约 10%~15%，进一步降低吊装难度和材料成本。

方向二：嵌入式应力监测：在关键受力支架中嵌入微型光纤光栅应变传感器，实时监测支架应力状态，通过无线传输将数据上传至运维管理平台，实现吊围栏结构安全的实时预警。在不增加构件自重 5%的前提下，实现结构健康监测能力。

方向三：自动化安装工装：研发专用的吊围栏安装辅助工装（含定位夹具、快速拧紧工具、单人操作吊装架），将单墩安装人员从3~4人进一步减少至2~3人，安装周期从1~2天缩短至1天以内。

10.2 中远期（24 个月内）—— 绿色低碳与数字化转型

方向一：绿色防腐体系升级：研发无铬钝化工艺替代传统含铬钝化，消除六价铬环境风险，满足 RoHS 指令和国内环保要求。同时探索水性封闭剂替代溶剂型封闭剂，降低 VOC 排放，在不降低防腐性能的前提下实现绿色制造。

方向二：BIM+数字孪生全流程数字化：建立吊围栏产品的 BIM 参数化族库，实现从设计选型→工厂制造→现场安装→运维管理的全流程数字化。工厂 MES 系统与 BIM 模型对接，实现构件生产进度、质量数据的实时追踪和可视化管理。

方向三：可循环周转设计：探索吊围栏的可周转设计，将部分标准构件（步板、栏杆、标准支架节段）设计为可快速拆卸、可跨项目周转使用的形式，进一步提升构件复用率至 80%以上，降低单次使用成本，响应建筑行业绿色低碳发展趋势。

方向四：系列化产品扩展：在墩身吊围栏基础上，扩展开发桥台检查通道、梁底检修吊篮、隧道附属钢结构等系列产品，形成桥梁附属钢结构全品类解决方案，实现“一个模数体系、多个产品形态”的平台化发展。

11. 附录（Appendix）

11.1 术语表（Glossary）

- **墩身吊围栏（Pier Body Hanging Fence）：**沿桥墩四周对称布置的附属钢结构系统，含墩顶吊篮、检查梯、钢格板平台及防护栏杆，为桥梁运营期墩身检查维护提供安全作业通道。
- **墩顶吊篮（Pier Top Basket）：**吊围栏系统的核心作业平台，沿桥墩顶帽四周布置，含直线段和圆弧段支架，铺设钢格板步板，设置防护栏杆。
- **检查梯（Inspection Ladder）：**设在固定支座墩的爬梯系统，含爬梯节段和中间平台，供维护人员上下墩身通行。

- **钢格板 (Steel Grating):** 由承载扁钢和横杆按一定间距排列焊接而成的开板式钢构件，用作吊围栏人行道步板，型号 G325/40/50S 表示承载扁钢 32×5 mm、间距 40 mm、横杆间距 50 mm。
- **预埋套筒 (Embedded Sleeve):** 预埋在墩身混凝土中的钢制套筒 (Φ40×200, 35 号钢)，用于与 M20 螺栓连接固定吊围栏支架。
- **化学锚栓 (Chemical Anchor):** 通过化学胶粘剂 (植筋胶) 将螺杆锚固在混凝土钻孔中的后锚固连接件，本系统采用 M20 特殊倒锥形胶粘型锚栓，8.8 级。
- **多元素粉末共渗 (Multi-element Powder Cementation):** 一种表面化学热处理工艺，在高温下将多种合金元素 (锌、铝、稀土等) 渗入钢件表面形成合金层，与基体冶金结合，具有优异的耐蚀性能。
- **Q/CR 749.3-2020:** 中国国家铁路集团有限公司企业标准《铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第 3 部分：附属钢结构》，规定了铁路桥梁附属钢结构的保护涂装体系和技术要求。
- **Q235B:** 碳素结构钢牌号，屈服强度≥235 MPa，B 表示质量等级 (常温冲击试验)，是桥梁附属钢结构的主流选材。
- **HPB300:** 热轧光圆钢筋牌号，屈服强度≥300 MPa，抗拉强度≥420 MPa，用于吊围栏栏杆圆钢和预埋钢筋。
- **8.8 级 (Property Class 8.8):** 紧固件性能等级标记，小数点前数字表示抗拉强度标称值/100 (800 MPa)，小数点后数字表示屈强比×10 (0.8)，即屈服强度≥640 MPa。
- **模数 (Module):** 标准化设计中的基本尺寸单位，本系统支架间距模数 630 mm，步板模数类型 I/II，通过模数组合实现构件标准化和互换性。

11.2 参考文献与标准 (References & Standards)

法律法规:

1. 《中华人民共和国安全生产法》(2021 年修正)
2. 《建设工程安全生产管理条例》(国务院令第 393 号)

国家标准:

3. GB/T 700-2006 《碳素结构钢》
4. GB 50017-2017 《钢结构设计标准》

5. GB 50205-2020 《钢结构工程施工质量验收标准》
6. GB 50661-2011 《钢结构焊接规范》
7. GB/T 3098.1-2010 《紧固件 螺栓、螺钉和螺柱的机械性能》
8. GB/T 1499.1-2017 《钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋》
9. GB/T 13912-2020 《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》
10. JGJ 80-2016 《建筑施工高处作业安全技术规范》
11. JGJ 59-2011 《建筑施工安全检查标准》

行业标准：

12. TB 10002-2017 《铁路桥涵设计规范》
13. TB 10091-2017 《铁路桥梁钢结构设计规范》
14. TB 10415-2018 《铁路桥涵工程施工质量验收标准》
15. Q/CR 749.3-2020 《铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第3部分：附属钢结构》
16. JTG/T 3650-2020 《公路桥涵施工技术规范》
17. JTG F80/1-2017 《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》
18. YB/T 4001.1-2019 《钢格栅板及配套件 第1部分：钢格栅板》

参考资料：

19. 浙江宝佳力科技有限公司产品技术资料（2026年版）
20. 宁波至慈溪市域（郊）铁路工程桥梁附属及预埋件施工图（B5版，上海市市政工程设计研究总院，2025年10月）
21. 金华枢纽沪昆线双48m连续梁墩身吊围栏施工图（JHKRZQSG03-D04）
22. 中国建筑业协会《2024年度重大基础设施项目施工工艺白皮书》
23. 中国焊接协会《2024年智能焊接技术白皮书》

11.3 产品参数表 (Product Specifications)

参数类别	参数名称	数值/规格
荷载	吊篮支架静活载标准值	4.0 kN/m ²
荷载	墩顶悬臂板竖向集中荷载	1.5 kN
结构	吊篮宽度	600~800 mm (标准 630 mm)

结构	直段支架间距	630 mm (可调 600~700 mm)
结构	防护栏杆高度	≥1100 mm
结构	挡脚板高度	≥100 mm
材料	水平支架角钢	∠63×63×6, Q235B
材料	竖向支架角钢	∠75×75×8, Q235B
材料	斜撑角钢	∠63×63×6, Q235B
材料	栏杆圆钢	Φ16, HPB300
材料	预埋钢筋	Φ20, HPB300
材料	钢格板	G325/40/50S
连接	连接螺栓	M20×70, 8.8 级
连接	栏杆螺栓	M16 双螺母
连接	化学锚栓	M20 特殊倒锥形, 8.8 级
连接	预埋套筒	Φ40×200, 35 号钢
连接	螺栓与套筒连接长度	≥30 mm
步板	步板与角钢搭接长度	≥40 mm
步板	每块步板安装夹数量	≥2 个
步板	安装夹螺栓力矩	30~40 N·m
防腐	涂装体系	Q/CR 749.3-2020 第 1 套
防腐	总干膜最小厚度	≥70 μm
防腐	适用腐蚀环境	C1~C5
精度	构件尺寸公差	±1.5 mm
精度	焊接一次合格率	≥99%
安装	单墩安装周期	1~2 天
安装	现场作业人员	3~4 人
单墩用量	平头墩 4.3×2.6 m	约 1027 kg
单墩用量	双 48 连续梁矩形墩	约 1813 kg

(本白皮书完)

浙江宝佳力科技有限公司

地址：浙江省绍兴市柯桥区绍兴科大产业园

电话：+86-13336064501

官网：<https://www.mybojali.com>

本档内容如有更新，恕不另行通知。产品技术参数以实际供货合同及技术协议为准。