

浙江宝佳力桥梁挂篮防护系统技术白皮书

Technical White Paper of Zhejiang Baojiali Bridge Hanging Basket
Protection System

桥梁挂篮兜底防护系统

工厂全预制、标准化模数、全封闭防护的桥梁悬臂浇筑施工安全
防护解决方案



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 / 桥梁悬臂浇筑防护

浙江宝佳力桥梁挂篮防护系统技术白皮书 1

桥梁挂篮兜底防护系统 1

1. 摘要 (Executive Summary) 4

2. 行业背景与痛点分析 (Industry Background & Challenges) 4

 2.1 应用场景现状 4

 2.2 传统方案的核心痛点 5

3. 产品概述与技术愿景 (Product Overview & Vision) 6

 3.1 产品定位 6

 3.2 技术愿景 6

 3.3 功能融合点 6

 3.4 价值主张 6

4. 核心技术架构 (Core Technical Architecture) 6

 4.1 系统组成清单 6

 4.2 核心材料选型与加强设计 7

 4.3 标准化模数体系 7

 4.4 场景自适应体系 8

5. 关键技术与创新点 (Key Technologies & Innovations) 8

 5.1 工厂全预制螺栓装配技术 8

 5.2 双拼槽钢主梁高刚度技术 9

 5.3 1.5mm 钢板全封闭兜底防护技术 9

 5.4 $\phi 32$ HRB400 吊杆高安全系数技术 9

 5.5 标准化模数高周转设计技术 10

6. 安全、合规与可用性保障 (Security, Compliance & Reliability) 10

 6.1 核心安全可靠指标 10

 6.2 全流程保障机制 11

6.3 合规标准与质量控制	12
7. 性能基准与技术数据 (Performance Benchmark)	12
7.1 与传统方案性能对比	12
7.2 核心技术参数汇总	13
8. 开放能力与组合能力 (Openness & Combinatorial Flexibility)	14
8.1 配置/拓扑灵活性	14
8.2 多场景/多规模适配	14
8.3 生态集成	14
9. 典型技术应用场景落地 (Technical Use Cases)	15
9.1 通苏嘉甬高速铁路 11 标段 —— 跨宁波绕城高速特大桥	15
9.2 其他典型应用场景	16
10. 未来技术演进路线 (Future Roadmap)	16
10.1 近中期 (12 个月内) —— 轻量化与智能化	16
10.2 中远期 (24 个月内) —— 平台化与绿色化	17
11. 附录 (Appendix)	17
11.1 术语表 (Glossary)	17
11.2 参考文献/标准	18
11.3 产品设计图/参数表	18

1. 摘要 (Executive Summary)

随着我国高速铁路、高速公路和城市桥梁建设向大跨度、高墩身、复杂地形方向发展，悬臂浇筑法（挂篮施工）已成为大跨径预应力混凝土连续梁/刚构桥的主流施工工法。然而，挂篮下方高空作业区域的物体坠落风险始终是桥梁施工安全管理重点和难点——工具、材料、混凝土碎块等一旦从挂篮作业面坠落，将对下方人员、设备和已完结结构构成严重威胁。

传统挂篮下方防护多采用现场散焊型钢骨架加铺安全网的临时做法，存在焊接质量不可控、安装周期长、防护不严密、风荷载下稳定性差、周转利用率低等突出问题。

针对上述行业痛点，浙江宝佳力科技有限公司自主研发了“桥梁挂篮兜底防护系统”。本系统以“工厂全预制+标准化模数+全封闭防护”为核心理念，采用 2[25b 双拼槽钢主梁、B50×4.0 方管框架、1.5mm 钢板面板和 $\Phi 32$ HRB400 螺纹钢吊杆的标准化结构体系，通过工厂数控下料、机器人焊接、全自动涂装实现质量稳定可控，现场仅需螺栓装配即可完成安装。系统经通苏嘉甬高速铁路 11 标段等多个项目验证，最大组合应力 208.19MPa（限值 215MPa），吊杆安全系数 ≥ 2.0 ，主梁挠度 $\leq L/400$ ，全部满足规范要求；周转次数 ≥ 10 次，全周期成本降低 40%以上，为桥梁悬臂浇筑施工提供了安全、高效、经济的全封闭防护解决方案。

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

2.1 应用场景现状

悬臂浇筑法是大跨径预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥、斜拉桥主梁等桥型的核心施工工法。其基本原理是：在已浇筑完成的墩顶 0 号块上安装挂篮设备，利用挂篮作为移动作业平台，对称分段浇筑梁段混凝土，待混凝土达到设计强度后张拉预应力筋，然后将挂篮向前移动一个节段，循环作业直至合龙。

在悬臂浇筑施工过程中，挂篮下方通常是数十米甚至上百米的高空区域，下方可能存在：

- 正在施工的下部结构（桥墩、承台）

- 已通车的公路、铁路（如跨线桥施工）
- 河流、航道（如跨河桥施工）
- 居民区、厂区（如城市桥梁施工）

挂篮作业面上的钢筋、模板、混凝土、工具、小型设备等任何物体一旦坠落，都可能造成人员伤亡、设备损坏或交通事故。因此，挂篮下方的全封闭安全防护是桥梁施工安全管理的强制性要求。

2.2 传统方案的核心痛点

当前桥梁施工中，挂篮下方防护主要采用以下几种传统做法，均存在明显不足：

● **现场散焊型钢骨架+安全网：** 施工单位在现场用型钢（工字钢、槽钢、方管等）焊接成防护骨架，上铺安全网或竹笆片。由于现场焊接条件有限，焊缝质量参差不齐，关键受力焊缝缺乏探伤检测，存在焊接缺陷导致的结构失效风险；安全网网孔较大，小颗粒物体（如混凝土碎块、螺栓螺母）可穿透坠落，防护不严密；现场散焊安装周期长，通常需要 3~5 天，占用挂篮移动关键线路时间。

● **竹笆片/木板临时铺设：** 在挂篮下方用竹笆片或木板简单铺设作为兜底防护。这种做法承载力极低，无法承受工具、材料坠落的冲击荷载；竹笆片和木板易燃，存在火灾隐患；且易受雨水腐蚀，使用寿命短，周转次数极少，综合成本并不经济。

● **无专门兜底防护，仅依赖安全网：** 部分项目仅在挂篮侧面设置安全网，下方无专门兜底防护。这是最危险的做法，完全无法防止物体从挂篮下方坠落，违反《建筑施工高处作业安全技术规范》JGJ 80 的相关要求，存在重大安全隐患。

● **定制化焊接防护平台，不可周转：** 部分项目根据特定挂篮型号定制焊接防护平台，但由于不同项目挂篮型号、跨度、梁宽差异大，定制化平台无法跨项目周转使用，项目结束后即报废，材料浪费严重，全周期成本高昂。

上述传统方案的共同问题可以归纳为：**安全可靠不足、安装效率低下、防护严密性不够、周转利用率低、全周期成本高**。这些痛点长期困扰桥梁施工单位，亟需一种标准化、工厂化、可周转的全封闭防护解决方案。

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“桥梁挂篮兜底防护系统”。该产品精准定位于桥梁悬臂浇筑施工的挂篮下方全封闭安全防护，旨在通过“工厂全预制+标准化模数+螺栓快装”的核心理念，取代传统现场散焊模式，为桥梁施工单位提供安全可靠、安装快捷、防护严密、可多次周转的标准化防护解决方案。

3.2 技术愿景

让桥梁高空防护如工业制造般标准、安全、高效。

3.3 功能融合点

本系统一体化整合了以下原本分散的功能环节：

- **承力框架：**2[25b 双拼槽钢主梁+B50×4.0 方管次梁，构成标准化承力体系
- **全封闭面板：**1.5mm 钢板面板满铺，实现零坠落风险的兜底防护
- **侧面防护：**钢板网/密目网全封闭围护，防止侧向物体坠落
- **悬挂系统：**φ 32 HRB400 螺纹钢吊杆，安全可靠地将防护系统悬挂于挂篮下方
- **连接系统：**法兰盘+M20 8.8 级高强螺栓，实现快速装配和可靠连接

3.4 价值主张

通过工厂标准化制造实现质量稳定可控（焊接一次合格率≥99%），通过标准化模数设计实现跨项目周转（周转次数≥10 次），通过螺栓快装实现安装效率提升（较现场散焊缩短 50%以上），最终为客户实现“省事、省心、省钱”的三重价值——省事（安装快、不占关键线路）、省心（质量可控、安全可靠）、省钱（高周转、全周期成本降低 40%+）。

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

4.1 系统组成清单

桥梁挂篮兜底防护系统由以下核心部件组成，各部件均在工厂预制完成，现场仅需螺栓装配：

NO.	部件/模块名称	规格/型号/参数	功能说明
1	主梁	2[25b 双拼槽钢（可按荷载调	主要承力构件，承受系统全部荷载并传

		整)	递至吊杆
2	次梁/框架	B50×4.0 方管	框架结构, 支承面板, 与主梁共同构成承力体系
3	面板	1.5mm 厚钢板	全封闭兜底, 防止物体坠落
4	吊杆	Φ 32 HRB400 螺纹钢	悬挂系统, 将防护系统悬挂于挂篮下方
5	防护网	钢板网/密目网	侧面全封闭防护
6	连接螺栓	M20 8.8 级高强螺栓	构件间的可靠连接
7	吊耳板	t=10mm 钢板	吊杆与主梁的连接节点
8	踢脚板	高度≥180mm	防止小物体从边缘滚落

4.2 核心材料选型与加强设计

主体材料选型:

- 主梁、次梁、面板、吊耳板均采用 Q235B 碳素结构钢, 符合 GB/T 700 要求。Q235B 具有良好的塑性、韧性和焊接性能, 屈服强度 235MPa, 抗拉强度 375~500MPa, 适用于承受静力荷载为主的防护结构。对于大跨度、大荷载工况, 可升级为 Q355B 低合金高强度结构钢 (符合 GB/T 1591 要求), 屈服强度 355MPa, 在相同承载能力下可减小构件截面、降低自重。
- 吊杆采用 HRB400 热轧带肋钢筋, 符合 GB/T 1499.2 要求, 屈服强度 400MPa, 抗拉强度 540MPa, 抗拉设计值 360N/mm^2 。HRB400 钢筋具有强度高、延性好、与混凝土握裹力强等特点, 作为吊杆使用时安全可靠。
- 连接螺栓采用 8.8 级高强度螺栓, 符合 GB/T 3098.1 要求, 抗拉强度 800MPa, 屈服强度 640MPa, 确保构件连接的可靠性。

加强设计:

- 主梁采用 2[25b 双拼槽钢形式, 通过缀板连接形成整体截面, 较单根槽钢大幅提升了抗弯刚度和整体稳定性。25b 槽钢截面高度 250mm, 腿宽 80mm, 腰厚 9mm, 截面积 39.917cm^2 , 理论重量 31.335kg/m , 惯性矩 $I_x=3530\text{cm}^4$, 抗弯截面模量 $W_x=282.4\text{cm}^3$ 。双拼后截面模量翻倍, 可满足大跨度 (15m 级) 主梁的抗弯要求。
- 吊杆节点采用 t=10mm 厚吊耳板+加劲肋的加强设计, 吊耳板与主梁采用坡口熔透焊连接, 确保吊杆拉力可靠传递至主梁。吊耳板孔径较吊杆直径大 2mm, 便于安装对位。
- 面板与框架采用间断焊或螺栓连接, 面板拼接处设置搭接边, 确保拼接紧密、无空隙。面板四周设置上翻边 (高度≥50mm), 防止积水和小物体从边缘滑落。

4.3 标准化模数体系

核心设计哲学: 用尽量少的标准模块, 组合出尽量多的场景适配。

基础规格:

- 主梁标准长度：3m、6m、9m、12m、15m 五种标准规格，通过法兰连接可组合出任意跨度
- 次梁标准间距：500mm，框架模数 500mm×500mm
- 面板标准尺寸：1000mm×500mm，标准化模数便于更换和维修
- 吊杆标准长度：按项目定制，标准节段 1m，通过连接套筒可接长

组合方式：

- 平面组合：通过主梁和次梁的不同组合，可形成矩形、梯形、异形等多种平面形状，适配不同梁宽和挂篮型号
- 垂直悬挂：通过吊杆长度的调整，可适应不同的悬挂高度和挂篮底模标高
- 模块连接：主梁之间采用法兰盘+M20 高强螺栓连接，次梁与主梁采用 U 型螺栓或焊接连接，面板与框架采用螺栓或间断焊连接

4.4 场景自适应体系

标准化模块+扩展接口+配件体系使本系统可覆盖多种工况：

- **跨度适配：**主梁标准长度 3~15m，通过法兰连接可组合出任意跨度，覆盖从 24m 连续梁到 100m 以上大跨径桥梁的挂篮防护需求
- **梁宽适配：**通过次梁数量和面板的增减，可适配不同梁宽（从单箱单室到多箱多室截面）
- **挂篮型号适配：**吊杆悬挂点可根据挂篮底模横梁位置灵活调整，适配菱形挂篮、三角形挂篮、弓弦式挂篮等多种挂篮型号
- **风荷载适配：**根据项目所在地基本风压和计算高度，可调整主梁规格（从 2[20b 到 2[32b）和吊杆数量，确保风荷载作用下的结构安全

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

5.1 工厂全预制螺栓装配技术

传统做法： 现场散焊型钢骨架，焊接质量受现场环境（风力、温度、湿度）和焊工水平影响大，关键焊缝缺乏探伤检测，焊接缺陷率高；现场焊接安装周期长，通常 3~5 天，占用挂篮移动关键线路时间。

本产品做法： 所有构件在工厂内完成数控下料、机器人焊接、全自动涂装。数控切割尺寸偏差±1.5mm，机器人焊接焊缝质量稳定，关键焊缝 100%探伤检测，焊接一次合格

率 $\geq 99\%$ 。构件运至现场后，仅需通过法兰盘+M20 8.8 级高强螺栓进行装配，无需现场焊接，2~3 名工人 1 天内即可完成一套标准防护系统的安装。

量化效益： 安装时间缩短 60%以上（从 3~5 天缩短至 1 天），焊接一次合格率从现场散焊的约 85%提升至 $\geq 99\%$ ，现场安装人工减少 50%。

5.2 双拼槽钢主梁高刚度技术

传统做法： 采用单根工字钢或槽钢作为主梁，截面刚度有限，大跨度下挠度大，需加密吊杆或减小跨度，增加了悬挂点数量和安装复杂度。

本产品做法： 采用 2[25b 双拼槽钢作为主梁，通过缀板连接形成整体箱形截面。双拼槽钢较单根同规格槽钢，截面惯性矩和抗弯截面模量翻倍，整体稳定性大幅提升。在 15m 跨度、自重+满布荷载+风荷载组合作用下，主梁最大挠度仅 0.09mm，远小于 $L/400=37.5\text{mm}$ 的限值，刚度储备充足。

量化效益： 主梁抗弯刚度提升 100%（较单根槽钢），15m 跨度下挠度仅 0.09mm（限值 37.5mm），吊杆间距可从传统的 3~4m 增大至 6~8m，悬挂点数量减少 40%。

5.3 1.5mm 钢板全封闭兜底防护技术

传统做法： 采用安全网、竹笆片或木板作为兜底防护，网孔大、承载力低、易破损，小颗粒物体可穿透坠落，大物体坠落时可击穿防护，防护严密性不足。

本产品做法： 采用 1.5mm 厚钢板面板满铺，面板与框架采用间断焊或螺栓连接，面板拼接处设置搭接边，拼接缝隙 $\leq 10\text{mm}$ ，实现真正的全封闭兜底防护。1.5mm 钢板可承受工具、小型材料坠落的冲击荷载，混凝土碎块、螺栓螺母等小物体完全无法穿透。面板四周设置上翻边（ $\geq 50\text{mm}$ ）和踢脚板（ $\geq 180\text{mm}$ ），防止物体从边缘滚落。

量化效益： 防护严密性从安全网的“防大物、漏小物”提升至钢板的“零穿透、全封闭”，面板抗冲击承载力提升 300%以上（较竹笆片），彻底消除物体穿透坠落风险。

5.4 $\phi 32$ HRB400 吊杆高安全系数技术

传统做法： 采用普通圆钢或钢丝绳作为吊杆，安全系数低，无明确的力学计算依据，存在吊杆断裂导致整体坠落的风险。

本产品做法： 采用 $\phi 32\text{mm}$ HRB400 热轧带肋钢筋作为吊杆，抗拉设计值 $360\text{N}/\text{mm}^2$ ，单根吊杆抗拉承载力达 289.38kN 。在通苏嘉甬项目最不利工况下，吊杆最大受力仅 27.8kN ，安全系数达 10.4 倍，远高于规范要求的 ≥ 2.0 。吊杆与主梁通过 $t=10\text{mm}$ 厚吊耳板+坡口熔透焊连接，节点安全可靠。系统还设置防坠落二次保护，防止单根吊杆断裂后整体坠落。

量化效益： 吊杆安全系数 ≥ 2.0 （实际达 10.4 倍），吊杆抗拉承载力 289.38kN （最大受力 27.8kN ），多重防坠落保护，彻底消除吊杆断裂风险。

5.5 标准化模数高周转设计技术

传统做法： 根据特定挂篮型号定制焊接防护平台，不同项目挂篮型号、跨度、梁宽差异大，定制化平台无法跨项目周转，项目结束后即报废，材料浪费严重。

本产品做法： 采用标准化模数设计，主梁、次梁、面板、吊杆均为标准规格，通过法兰连接和螺栓装配可组合出不同跨度、不同梁宽、不同挂篮型号的防护系统。项目结束后，构件可拆卸、分类堆放、转运至下一项目重复使用，周转次数 ≥ 10 次。热浸锌防腐层（锌层 $\geq 65\mu\text{m}$ ）确保构件在户外环境下长期使用不锈蚀。

量化效益： 周转次数 ≥ 10 次（定制化平台通常仅 1 次），全周期成本降低 40%以上，材料浪费减少 90%，符合绿色施工和循环经济理念。

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

6.1 核心安全可靠指标

本系统在设计、制造、安装和使用各环节均有明确的安全可靠性指标：

指标项	设计值/要求	验证手段
主梁最大组合应力	$\leq 215\text{MPa}$ (Q235B)	有限元分析+现场实测
主梁最大剪应力	$\leq 125\text{MPa}$	有限元分析
主梁最大挠度	$\leq L/400$	有限元分析+现场实测
吊杆安全系数	≥ 2.0	力学计算
吊杆抗拉承载力	289.38kN ($\phi 32$ HRB400)	力学计算+材料试验
焊接一次合格率	$\geq 99\%$	焊缝探伤检测
面板抗冲击承载力	承受工具、材料坠落冲击	冲击试验
抗风等级	按项目所在地风荷载设计	风荷载计算
防腐寿命	热浸锌 $\geq 65\mu\text{m}$ ，户外 ≥ 10 年	盐雾试验+测厚仪检测

周转次数	≥10 次	实际项目验证
------	-------	--------

在通苏嘉甬高速铁路 11 标段项目验证中，系统在最不利荷载组合（自重+满布荷载+风荷载）下：

- 最大组合应力 208.19MPa（限值 215MPa），合格率 96.8%
- 最大剪应力 12.89MPa（限值 125MPa），合格率仅 10.3%，储备充足
- 主梁挠度 0.09mm（限值 37.5mm），挠度仅为限值的 0.24%
- 次梁挠度 5.93mm（限值 20mm），挠度为限值的 29.7%
- 吊杆受力 27.8kN（承载力 289.38kN），安全系数 10.4 倍

6.2 全流程保障机制

设计阶段：

- 专业结构工程师团队，根据项目具体工况（跨度、梁宽、挂篮型号、风荷载、施工荷载等）进行专项设计计算
- 采用 Midas Gen 等专业结构分析软件进行有限元分析，确保强度、刚度、稳定性满足规范要求
- 出具专项设计计算书，经编制、复核、审核三级签字确认
- 支持定制化设计，满足特殊工况需求

制造阶段：

- 2 大现代化生产基地，总生产面积超 22000 平方米，全自动化流水线
- 数控切割下料，尺寸偏差±1.5mm
- 机器人焊接，焊缝质量稳定，关键焊缝 100%超声波探伤检测
- 全自动涂装线，热浸镀锌层厚度≥65 μm
- 出厂前逐套检验，出具产品合格证和材质证明

安装阶段：

- 技术人员现场指导安装，确保安装质量和安全
- 安装前进行安全技术交底，明确安装顺序、质量标准和安全要求
- 安装完成后进行荷载试验和全面验收，验收合格后方可使用
- 提供安装说明书和验收标准，指导施工单位规范操作

使用阶段：

- 每日使用前检查连接螺栓、防护网、面板是否完好
- 每周检查吊杆、主梁、次梁的连接和变形情况

- 大风、雷雨天气后进行专项检查
- 定期紧固连接螺栓，发现问题及时处理
- 建立安全管理档案，记录检查、维护、维修情况

6.3 合规标准与质量控制

本系统设计、制造、安装和验收严格遵循以下国家标准和行业标准：

标准号	标准名称	适用环节
GB 50017-2017	《钢结构设计标准》	结构设计
GB 50009-2012	《建筑结构荷载规范》	荷载取值
GB/T 700-2006	《碳素结构钢》	材料采购
GB/T 1591-2018	《低合金高强度结构钢》	材料采购 (Q355B)
GB/T 1499.2-2018	《钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋》	吊杆材料
GB/T 3098.1-2010	《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》	连接螺栓
GB 50661-2011	《钢结构焊接规范》	焊接制造
GB 50205-2020	《钢结构工程施工质量验收标准》	制造验收
JGJ 80-2016	《建筑施工高处作业安全技术规范》	安全防护
JTG/T 3650-2020	《公路桥涵施工技术规范》	桥梁施工

质量控制体系：

- 原材料进厂检验：每批钢材均需提供产品质量合格证和材质证明，关键材料进行复检
- 制造过程检验：下料尺寸、焊接质量、防腐厚度等关键工序 100%检验
- 出厂检验：逐套进行外观检查、尺寸检查、连接试装，出具合格证
- 现场安装验收：按验收标准逐项检查，验收合格签字确认

7. 性能基准与技术数据 (Performance Benchmark)

7.1 与传统方案性能对比

在同等工况（15m 跨度、挂篮下方兜底防护、宁波地区风荷载、满布荷载 15kg/m²）

下，本产品与两种传统方案的性能对比如下：

技术/经济指标	传统方案 A：现场散焊型钢+安全网	传统方案 B：竹笆片/木板临时铺设	本产品：工厂预制标准化系统	技术突破效益
主体材质	现场采购型钢（规格不一）	竹笆片/木板	Q235B 标准化型钢（2[25b 双拼槽钢+B50 方管）	材质统一，质量可控

兜底防护材料	安全网（网孔大）	竹笆片/木板（承载力低）	1.5mm 钢板（全封闭）	防护严密性提升，零穿透
主梁规格	单根工字钢/槽钢（刚度有限）	无主梁（直接铺在挂篮上）	2[25b 双拼槽钢（高刚度）	抗弯刚度提升 100%
吊杆规格	普通圆钢/钢丝绳（安全系数低）	无吊杆（直接固定）	Φ32 HRB400（安全系数≥2.0）	吊杆安全可靠，多重保护
焊接质量	现场散焊（合格率约 85%）	无焊接	工厂机器人焊（合格率≥99%）	焊接质量提升，缺陷率降低
安装周期	3~5 天（现场焊接）	1~2 天（简单铺设）	1 天（螺栓装配）	安装时间缩短 60%+
安装人工	5~8 人（含焊工）	3~4 人	2~3 人（无需焊工）	人工减少 50%
防护严密性	防大物、漏小物	承载力低、易破损	零穿透、全封闭	彻底消除坠落风险
抗风能力	一般（风荷载下易变形）	差（易被风吹翻）	按风荷载设计，稳定性好	抗风能力显著提升
周转次数	1~2 次（变形后报废）	1 次（一次性使用）	≥10 次（标准化模块）	周转次数提升 5~10 倍
全周期成本	高（每次重新制作）	低但不安全	中（高周转摊薄成本）	全周期成本降低 40%+
合规性	部分满足（焊接质量不可控）	不满足（承载力不足）	完全满足（有计算书+验收标准）	合规性有保障

7.2 核心技术参数汇总

参数项	指标	备注
主梁规格	2[25b 双拼槽钢	可按荷载调整为 2[20b~2[32b
次梁/框架规格	B50×4.0 方管	标准间距 500mm
面板厚度	1.5mm 钢板	全封闭兜底
主体材质	Q235B	可升级 Q355B
吊杆规格	Φ32 HRB400 螺纹钢	抗拉设计值 360N/mm ²
吊杆安全系数	≥2.0	实际可达 10 倍以上
吊杆单根承载力	289.38kN	Φ32 HRB400
主梁最大挠度	≤L/400	15m 跨实际 0.09mm
满布荷载	15kg/m ²	设计值
最大组合应力	≤215MPa	Q235B 限值，实际 208.19MPa
最大剪应力	≤125MPa	实际 12.89MPa
连接螺栓	M20 8.8 级高强螺栓	符合 GB/T 3098.1
吊耳板厚度	10mm	Q235B
踢脚板高度	≥180mm	四周连续设置
防腐体系	热浸锌，锌层≥65μm	户外寿命≥10 年
周转次数	≥10 次	标准化模块设计
主梁标准长度	3m、6m、9m、12m、15m	法兰连接可组合任意跨度
面板标准尺寸	1000mm×500mm	标准化模数
安装周期	1 天（2~3 人）	螺栓装配，无需焊接

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

8.1 配置/拓扑灵活性

本系统采用标准化模数设计，基础模块可组合出多种形态：

- **矩形防护平台：**最常见的形式，主梁平行布置，次梁垂直于主梁，面板满铺，适用于等截面梁段的挂篮防护
- **梯形/异形防护平台：**通过主梁长度的变化和次梁的灵活布置，可形成梯形、多边形等异形平面，适配变截面梁段和特殊挂篮型号
- **分段式防护平台：**将大跨度防护平台分为若干标准段，每段独立悬挂，便于安装和拆除，适用于超宽梁体的挂篮防护
- **带通道防护平台：**在防护平台中预留人员通道和材料运输通道，通道口设置活动盖板和安全门，兼顾防护和通行需求

8.2 多场景/多规模适配

本系统可覆盖以下典型场景与规格跨度：

场景类型	跨度范围	梁宽范围	挂篮型号	配置说明
中小跨径连续梁	24~48m	3~8m	菱形挂篮/三角形挂篮	2[20b~2[25b 主梁，标准配置
大跨径连续梁/刚构	48~120m	8~15m	菱形挂篮/弓弦式挂篮	2[25b~2[32b 主梁，加密吊杆
超大跨径桥梁	120m 以上	15m 以上	重型挂篮	2[32b 以上主梁，定制化设计
城市跨线桥	30~60m	6~12m	各类挂篮	标准配置，侧重全封闭防坠落
跨河/跨海桥	48~120m	8~15m	各类挂篮	加强防腐，侧重抗风稳定性

8.3 生态集成

本系统可与桥梁施工上下游主流装备和系统兼容协同：

- **挂篮设备兼容：**适配菱形挂篮、三角形挂篮、弓弦式挂篮、预应力混凝土挂篮等主流挂篮型号，吊杆悬挂点可根据挂篮底模横梁位置灵活调整
- **施工电梯/塔吊协同：**防护平台预留材料吊装口和人员通道口，可与施工电梯、塔吊协同作业，不影响材料垂直运输
- **安全监测系统集成：**可在主梁、吊杆关键部位安装应力传感器和位移传感器，接入施工现场安全监测平台，实现实时监测和预警
- **标准化接口：**主梁法兰连接接口、吊杆连接套筒、面板固定螺栓孔均为标准化设计，可与其他厂家的标准化防护构件兼容互换

9. 典型技术应用场景落地 (Technical Use Cases)

9.1 通苏嘉甬高速铁路 11 标段 — 跨宁波绕城高速特大桥

项目概况：

通苏嘉甬高速铁路是国家中长期铁路网规划“八纵八横”高速铁路主通道之沿海通道的重要组成部分。11 标段跨宁波绕城高速特大桥采用悬臂浇筑法施工，挂篮下方为已通车的宁波绕城高速公路，车辆通行密集，对挂篮下方防护的严密性和可靠性要求极高。

防护配置：

- 主梁：2[25b 双拼槽钢，最大跨度 15m
- 框架：B50×4.0 方管，间距 500mm
- 面板：1.5mm 钢板满铺
- 吊杆：Φ32 HRB400 螺纹钢
- 适用墩位：120-123#墩、80-81 墩

设计验算：

由中铁二局集团有限公司与浙江宝佳力科技有限公司联合设计，出具专项受力计算书（正式盖章版）。关键验算结果：

- 网片自重 2 吨（折合线荷载 0.323kN/m）
- 宁波 10 年基本风压 0.30kN/m²，计算高度 26m，风荷载标准值 0.51kN/m²
- 满布荷载 15kg/m²
- 最大组合应力 208.19MPa（限值 215MPa），合格
- 最大剪应力 12.89MPa（限值 125MPa），合格
- 主梁挠度 0.09mm（限值 L/400=37.5mm），合格
- 次梁挠度 5.93mm（限值 L/400=20mm），合格
- 吊杆最大受力 27.8kN，抗拉承载力 289.38kN，安全系数 10.4 倍，合格

应用效果：

系统安装便捷（2~3 人 1 天完成），全封闭钢板兜底彻底消除了物体坠落风险，有效保护了下方宁波绕城高速的通行安全。项目实施期间未发生任何物体坠落事件，得到了建

设单位、监理单位和交通管理部门的高度认可。计算书经专家评审通过，已作为同类项目的参考范本。

[应用场景照片占位：通苏嘉甬高铁 11 标挂篮兜底防护系统现场安装照片]

9.2 其他典型应用场景

- **某高速公路跨江大桥：**主跨 120m 连续刚构桥，挂篮下方为通航河道，采用本系统 2[32b 双拼槽钢主梁加强配置，全封闭钢板兜底防止物体坠落入河，满足航道安全防护要求
- **某城市快速路跨线桥：**跨既有城市主干道，车流量大，采用本系统标准配置，1.5mm 钢板全封闭兜底+侧面防护网，确保下方车辆和行人安全
- **某铁路客运专线特大桥：**多联连续梁挂篮施工，采用本系统标准化模块，项目结束后构件转运至下一项目重复使用，已累计周转 3 次，全周期成本优势显著

10. 未来技术演进路线 (Future Roadmap)

10.1 近中期（12 个月内）——轻量化与智能化

方向一：材料轻量化

- 具体措施：在保证承载能力的前提下，探索采用 Q355B 低合金高强度钢替代 Q235B，减小构件截面，降低系统自重
- 量化目标：在相同承载能力下，系统自重降低 15%~20%，安装更便捷，吊杆受力更小

方向二：智能化监测

- 具体措施：在主梁关键截面和吊杆上安装微型应力传感器和倾角传感器，通过无线传输将数据发送至施工现场安全管理平台，实现防护系统受力状态的实时监测和超限预警
- 量化目标：关键部位监测覆盖率 100%，数据采集频率 ≥ 1 次/分钟，超限预警响应时间 ≤ 30 秒

方向三：安装工法优化

- 具体措施：开发标准化安装工装和快速连接节点，进一步缩短安装时间，降低对挂篮移动关键线路的影响
- 量化目标：标准配置安装时间从 1 天缩短至半天（4 小时），安装人工从 2~3 人减少至 2 人

10.2 中远期（24 个月内）——平台化与绿色化

方向一：模块化平台化

- 具体措施：将挂篮兜底防护系统升级为可扩展的模块化防护平台，除兜底防护外，可集成侧面防护、底部照明、消防设施、逃生通道等功能模块，形成“挂篮下方安全防护一体化平台”
- 量化目标：功能模块扩展至 5 种以上，模块间接口 100%标准化，可根据项目需求灵活组合

方向二：绿色低碳

- 具体措施：探索采用可回收材料和环保涂装工艺，降低产品全生命周期碳排放；优化包装和运输方式，减少物流环节碳排放
- 量化目标：产品全生命周期碳排放降低 20%，可回收材料占比 $\geq 95\%$

方向三：BIM 数字化交付

- 具体措施：建立挂篮兜底防护系统的 BIM 构件库，支持与桥梁施工 BIM 模型的集成和碰撞检查，实现防护系统的数字化设计、数字化加工和数字化交付
- 量化目标：BIM 构件库覆盖全部标准构件，支持主流 BIM 软件（Revit、Bentley、Tekla）的接口调用

11. 附录 (Appendix)

11.1 术语表 (Glossary)

- **挂篮 (Hanging Basket)**：悬臂浇筑法施工中的移动式作业平台，用于分段浇筑梁段混凝土，可沿已浇筑梁段向前移动。
- **悬臂浇筑法 (Cantilever Casting Method)**：大跨径预应力混凝土桥梁的主流施工方法，从墩顶 0 号块开始，利用挂篮对称分段浇筑梁段，逐段张拉预应力筋，直至合龙。
- **兜底防护 (Bottom Protection)**：设置在挂篮下方的全封闭防护设施，防止施工过程中物体坠落，保护下方人员、设备和已完结构安全。
- **双拼槽钢 (Double Channel Steel)**：将两根槽钢背靠背或面对面通过缀板连接形成的整体截面构件，较单根槽钢具有更大的抗弯刚度和整体稳定性。
- **HRB400 钢筋 (HRB400 Steel Bar)**：热轧带肋钢筋的一种，屈服强度 400MPa，抗拉强度 540MPa，具有强度高、延性好的特点。

- **热浸锌 (Hot-Dip Galvanizing)**：将除锈后的钢构件浸入熔融锌液中，使钢构件表面附着锌层的防腐处理工艺，锌层厚度 $\geq 65 \mu\text{m}$ 时户外使用寿命可达 10 年以上。
- **满布荷载 (Uniformly Distributed Load)**：均匀分布在防护平台上的施工荷载，本系统设计值为 $15\text{kg}/\text{m}^2$ 。
- **吊杆安全系数 (Safety Factor of Hanger Rod)**：吊杆抗拉承载力与最大工作拉力的比值，本系统设计要求 ≥ 2.0 。
- **L/400 (挠度限值)**：主梁最大允许挠度为跨度的 1/400，是钢结构防护设施的常用挠度控制指标。
- **法兰连接 (Flange Connection)**：通过法兰盘和螺栓将两段构件连接在一起的连接方式，具有安装便捷、连接可靠、可拆卸重复使用的特点。

11.2 参考文献/标准

1. GB 50017-2017 《钢结构设计标准》
2. GB 50009-2012 《建筑结构荷载规范》
3. GB/T 700-2006 《碳素结构钢》
4. GB/T 1591-2018 《低合金高强度结构钢》
5. GB/T 1499.2-2018 《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》
6. GB/T 3098.1-2010 《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》
7. GB 50661-2011 《钢结构焊接规范》
8. GB 50205-2020 《钢结构工程施工质量验收标准》
9. JGJ 80-2016 《建筑施工高处作业安全技术规范》
10. JTG/T 3650-2020 《公路桥涵施工技术规范》
11. 通苏嘉甬高速铁路 11 标段跨宁波绕城高速特大桥挂篮兜底防护受力计算书（中铁二局×浙江宝佳力，2026 年）
12. 24m 连续梁挂篮兜底防护材料清单和技术要求（浙江宝佳力，2026 年）

11.3 产品设计图/参数表

[产品总装图占位：桥梁挂篮兜底防护系统总装图（俯视图、前视图、侧视图）]

[节点详图占位：主梁法兰连接节点、吊杆吊耳节点、面板固定节点详图]

[主梁参数表占位：2[20b、2[25b、2[28b、2[32b 双拼槽钢截面参数表]

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

经营理念：省事、省心、省钱

本白皮书内容基于截至 2026 年 8 月的产品技术状态和项目验证数据，产品规格和参数可能因技术升级而调整，具体以最新版产品技术文件为准。