



黄河蒲津渡遗址

(下)

山西省考古研究所 编著

刘永生 主编





黄河蒲津渡遗址

(下)

山西省考古研究所 编著
刘永生 主编



科学出版社
北京

**貳 蒲津渡遗址铁器群近期
抢救保护项目研究报告**

蒲津渡遗址铁器群近期抢救保护项目研究报告综述

一、项目摘要

黄河蒲津渡遗址铁牛等是唐开元年间（724年）蒲津浮桥的桥头地锚工程遗物，铁牛、铁人、铁山、铁柱等的组合是目前所发现同时期遗存中最大的铁器群。开展蒲津渡遗址的研究对古代黄河中游经济，文化，交通史，冶金史，桥梁史，以及冶炼、铸造、艺术等有重要的参考价值。出土后生存环境的巨大改变对铁质文物的保护是一个极大的挑战，自然也会引起社会各界的极大关注。1993年山西省文物局批准成立铁器群抢救保护研究课题组，对铁牛等实施有效保护。1996年保护方案经国家文物局组织专家论证原则同意。1997年国家文物局批准保护工程方案。经过12年的研究，在分析铁质文物保护的不同特点、借鉴他人经验及教训的基础上，不断修改、调整保护方法和方式。2004年经国家文物局批准，确定最终的保护实施方案。同年，全面完成了保护工程中改变周边恶劣环境，实现铁牛、铁人整体抬高调整后的“软着陆”，完成了现代（电化学阴极保护、施涂缓蚀剂）与传统的文物保护方法相结合的综合保护工程，使地面上和地面下的所有铁质文物保护都进入了良性保护的控制范围（图一三八~一四〇）。

二、前言

永济市黄河蒲津渡遗址于2001年被国务院公布为全国重点文物保护单位。这是我国首次发掘的大型黄河古代渡口遗址。以铁牛形象著称的蒲津浮桥桥头地锚，是我国古代桥梁工程史上的杰作。遗址中出土的以铁牛为代表的大型铁器群，是目前我国乃至世界上发现的同时期的最大的铁器群。古代大型田野铁质文物的保护是目前世界性难题。蒲津渡遗址文物保护工程是一项需要慎之又慎的保护工程。

三、课题研究背景和目的

位于山西省永济县蒲州古城西门外的蒲津渡遗址是黄河古代著名的三大渡口之一。早在战国秦昭襄王时，就已在此架设浮桥以通秦、晋，唐代开元盛世改建完成，是世界上最早的浮桥。作为桥头形象的铁牛以其精湛的工艺造型、高超的铸造技术、实用的工程价值，历来为世人所瞩目，是古代交通、冶金、桥梁、科技、雕塑等历史的重要实物例证。加之宋代著名工程专家怀丙和尚运用



图一三八 1990年11月蒲津渡遗址发现现场



图一三九 锈迹斑斑的铁牛、铁人的保存环境



图一四〇 1991年铁人出土环境

浮力和杠杆效应，从黄河中捞铁牛的故事被编入小学课本而广泛流传，铁牛更是家喻户晓。后因黄河河道抬高变迁，铁牛等被没在黄河中已有百年，完全看不到也已五十年。渡口与铁牛被埋入河中淤沙内，遗址面低于黄河水平面约5米，1989年铁牛等在蒲州古城西门外被再次发现，山西永济蒲津渡遗址铁器群自出土以来，一直受到社会各界的广泛关注。由于出土后，全靠四周不停抽水得以维系，铁牛等也不时被淹没成“水牛”，其铁质文物表层锈迹斑驳，呼吁保护铁牛的报道不断见诸报端。

1991年和1999年经国家文物局批准对蒲津渡遗址进行两次科学发掘，揭示出渡口遗址的面貌，搞清了铁牛周边的地层情况。1991年对遗址进行科学发掘，清理出土了渡口遗址的明代之后地层和东岸的四头铁牛、四尊铁人、两座铁山、三个铁墩及七根排列成北斗星状的铁柱等文物。1999年又进行了第二次发掘，全面揭示了作为地锚的铁牛的全貌，揭示了渡口的宋代和唐代地层遗迹。证实铁牛、铁人等文物是唐开元年间作为地锚用于固定铁索浮桥的工程遗物，其中每只铁牛重约50~75吨。气势恢宏的铁牛、铁人、铁山和七星柱等表现了唐代冶金铸造的高超技艺，也为后人留下了极其珍贵的宝物（彩版六九）。

铁质文物的保护是文物保护中的薄弱环节，对此国内外有关专家做了很多有益的尝试，但对在田野中外露的大型铁质文物的保护尚无成功经验。面对日益腐蚀严重的铁牛等铁器文物，时任中国社会科学院考古所所长的徐莘芳先生给我们推荐去请教中国科学院资深院士、世界著名材料学专家柯俊先生。柯先生分析铁牛成分后指出：元代之前的铁器，由于它的冶炼方式决定它的成分是低硫铁，腐蚀损坏的速度不会像说的那样快。蒲津渡遗址铁牛等是目前所发现的同时代最大的铁器群。铁质文物的保护要认真研究，科学进行，不要急于行事。在经过了几个单位的保护技术方案比较论证后，最后确定由山西省考古研究所、中国历史博物馆（2002年并入中国国家博物馆，为便于说明仍沿用了原批准名称）、北京科技大学共同组成课题组研究铁牛等的保护。

另外一些从事防腐研究的专家们也都为保护铁牛纷纷献计献策，中国文物研究所刘玉玲应邀亲自到永济工地考察，提出保护建议；华北电力试验研究所奚照英先生在动力设备的腐蚀与防护研究卓有成就，热情洋溢的自荐希望为保护尽绵薄之力；郑州铁路局苗松波先生更是热情推荐在东莞明飞公司研制的铁器防腐新产品，要为保护文物做贡献。

四、本课题的研究方法

山西省人民政府和国家文物局曾多次组织国家级论证会，专家们也多次呼吁：“进行铁牛防锈蚀工作已刻不容缓，应抓紧制定实施方案。”

根据这一精神，国家文物局和山西省文物局在1993年初组织了由山西省考古研究所牵头，中国历史博物馆科技部和北京科技大学冶金史研究所、腐蚀工程系联合参加的“蒲津渡遗址铁器群近期抢救保护研究课题组”。

课题组特邀著名世界材料科学家、中国科学院院士、中国科技考古研究会理事长、北京科技大学教授柯俊先生担任课题组顾问（彩版七〇，1）。

山西省考古研究所刘永生研究员担任课题总负责人，负责对环境的监测和保护工程及铁质文物

保护的组织实施。商彤流研究员、张俊才高级技师负责文物保护的实施。

由中国历史博物馆负责铁质文物地上部分的腐蚀保护。中国历史博物馆科技部周保中研究员，潘路研究员（现任中国国家博物馆文物科技保护中心主任）、姚青芳研究员、杨小林副研究员等担任化学保护方案的研究和制定。

由北京科技大学负责铁质文物地下部分的腐蚀保护。北京科技大学冶金与材料史研究所韩汝玢教授担任了铁质文物的成分分析检测和冶金史技术的研究。腐蚀与保护工程系吴荫顺教授、何积铨教授担任铁质文物地下埋藏部分的电化学保护技术研究。

杜水生、梁宏刚等博士都参加了课题组的工作。

联合课题组由山西省考古研究所负责统一协调领导。对蒲津渡遗址铁器群进行全面研究保护。

根据分工，中国历史博物馆承担地上部分方案设计（彩版七一），北京科技大学承担地下部分方案设计，山西省考古研究所负责当地环境检测与总体协调工作。

经过两年的研究，三方完成了各自方案的研究设计工作，并将研究报告向国家文物局和山西省人民政府及时作了报告。

经过5年多的实验研究，开始对铁柱、铁人实施保护措施；又经历了两年的不断调整，改进保护技术。随着保护工程的进行，保护条件的改善，铁牛等铁质文物脱离了低洼潮湿的恶劣环境，铁人、铁牛的真实面目显示出来，仍旧生气勃勃。

我们在保护的过程中首先解决的是铁牛原有的应力发生变化后如何保持平衡问题；其次在表层清理、脱盐、干燥和缓蚀剂使用中因地制宜，选用符合当地环境特征的缓蚀剂，起到保护作用；第三在电化学的保护上采用了先进有效的方式，可以直接监测保护的实施；第四是工作人员坚持不懈，在12年的时间里，锲而不舍地进行实验、观察、检测，孜孜不倦，潜心研究，不断改进，最终取得了收获（彩版七〇，2~4）。

五、本课题研究成果的理论意义和现实意义

蒲津渡遗址现存遗址环境已经改变，考虑到原地、原位、原貌保护的困难，1997年国家文物局批准同意的蒲津渡遗址保护工程方案，确定遗址原位升高12.2米，下做隔水层。对蒲津渡遗址铁器群采用整体提高的保护方案，从根本上解决了黄河地下水对其的危害，使文物脱离恶劣的地下环境，也节省了大量的人力和物力，同时解决了地上、地下接点保护上的难题，使整体保护工作更易操作、进行。

北京科技大学通过分析铁牛等的铁质成分、金相分析，专门铸造出与其相同的低硅低硫灰口铸铁试片。试片在实验室进行加速试验，研究了带锈铸铁在含盐湿砂（浸透3.5% NaCl溶液的细砂）中的腐蚀行为。测定了小试片的极化曲线，线性极化测量极化电阻 R_e 。并对大试片利用失重法测得平均腐蚀速度，分析砂锈层的生成对铸铁腐蚀的影响。研究表明，在含盐湿砂中生成了较厚砂锈层的带锈铸铁的腐蚀速度和电化学行为与铸铁相差很大。锈层内电化学状态的不均匀产生电偶腐蚀电池，加剧了不均匀腐蚀。所以较厚砂锈层不仅不能阻碍腐蚀过程继续发展，而且还有加速腐蚀发展的趋势。在对带锈铸铁在3.5% NaCl溶液中的腐蚀行为进行了研究，得出了与此相似的结论。

在蒲津渡遗址区域铁牛、铁柱附近的土壤中进行了模拟铁质文物的带锈铸铁现场保护实验研究。埋藏分别做1个月、6个月、1年、2年、3年、5年电化学保护检测试验。如：分析了铁质文物表面锈层的组成和结构；铁质文物周围土壤的土质、含水量、水质成分、水中含盐量、土壤电阻率和活性较高的腐蚀性菌类的品种和数量等的检测；铁质文物锈层及沙土锈与周围的条件和环境变迁等因素的关系；模拟文物铸铁样品在现场土壤中的腐蚀行为；在现场土壤中，模拟文物铸铁样品的镁合金牺牲阳极和锌合金牺牲阳极的阴极保护试验等。

实践证明，在黄河蒲津渡遗址的环境条件下，用电化学的方式对埋藏在地下的铁牛等铁质文物进行保护时，镁阳极的效果要优于锌阳极。

铁牛等铁质文物的保护经验和教训将为全国同类型的铁质文物提供可借鉴的有益的经验。

六、课题实施方法的确立

气势恢宏的铁牛、铁人、铁山和七星柱等即表现了唐代冶金铸造的高超技艺，也为后人留下了极其珍贵的宝物。但是，由于地下埋藏环境恶劣，土壤中含有大量的二氧化碳、厌氧菌、硫酸盐还原菌及氯化物，加上铁牛群出土后保存环境突变，大量氧气的侵入和大气风化，冻融的影响，使遗址上铁器处于腐蚀日益严重的状态。

铁质文物的保护需要有一定的环境条件。出土的铁牛等低于水平面，要保护需要四周不停地抽排水，增加了保护的经费和难度，不可预见的因素较多，原地、原位、原貌采取做五面封箱体的方式对铁牛等的保护方案，对环境无大改变，但要在后续的保护中投入大量的保证干燥的费用。对存在于大气环境的铁质文物的保护不能简单地将铁质文物盖房子保护，沧州铁狮子、临淄车马坑的保护为我们提供了经验教训。鉴于沧州铁狮子移动后着陆受力不匀造成损坏原因，此次特别注意到了铁牛的软着陆问题。

根据由山西省考古研究所、中国历史博物馆、北京科技大学三方共同制定的《永济蒲津渡遗址铁器群的近期抢救保护方案》，为此，我们首先对文物所处环境进行了调查。

1. 铁器群及周围环境宏观监测

根据课题分工，山西省考古研究所除负责整个课题的协调工作之外，主要负责对铁器群及其周围环境的宏观监测，包括以下几部分：铁器群所处位置的干湿度变化规律；水位的变化规律；气候状况、抽水量等；自然因素（风吹、雨淋）对铁器群的影响。

现根据1993年7月至1994年4月之间的连续记录及近年的多次实地考察和部分测试数据，汇报如下：

(1) 干湿度变化规律

为了解在不同季节、不同气候下铁器群周围干湿度的变化规律，利用干湿度计在现场进行连续观察，每天记录三个数据，分别为早8:00；中12:00；晚7:00。在观测的前两个月采用一个表，第三个月用一个表为主，另设三个参考表，主表位于遗址中荫棚下，距离地表2米左右。根据对所测数据的初步观察，所设参考表的数据与主表所测数据的初步观察，所设参考表的数据与主表所测数

据基本相符。故仅将主表所测数据以直方图形式表示，同时天气状况及水位、电力供应状况一起汇入直方图中，以利观察其相关情况。

1) 在七、八月份，相对干湿度为一年中最高，平均在 80%~90%，且在一天中变化不大，似乎以中午略高于早晚。

2) 大约在九、十、十一这三个月中，相对干湿度变化较大，早上最高达 80%~90%，晚上次之达 60%~70%，中午最低达 40%~50%，为全年中相对干湿度次高期。

3) 从十二月至次年二、三月份，由于所使用仪表的精度问题，也许是由于气温偏低，所测的同一时刻干度、湿度，大部分数据相同，因此无法计算其相对干湿度，仅有的几个数据，只能作参考，实难看到其真实情况，其值域主要集中在 80% 左右，且以 80% 左右的数据居多。

4) 三、四月份，所观察到的数据仍然存在上述问题，但数据的可利用率比上一阶段有所提高，基本上以早上较高，达 80% 左右，中午、晚上较低为 40%~50%。

总之，从全年来看，铁器所处环境的相对干湿度大部分在 80% 以上，一般都在 50% 以上，就文物保护而言，远远高于其文物保护专家提议的最好在 30% 以下的湿度指标。

(2) 水位变化

以两个井中水位观察点，一个位于铁器群西北为 1 号位，一个位于东南为 2 号位。在地上选相对零点，所测水位的数据全为负数。

根据记录，水位的变化主要受抽水情况的影响，一般在电力供应正常情况下水位可得到控制，停电时则水位急剧上升，一般达 0.5~1 米。

(3) 气候状况

气候仅区分阴、晴、雨三种状态，雨天主要集中在七至十月份。

(4) 自然因素对铁器群的影响

1) 由于风吹、日晒，加之环境潮湿，铁器群在锈蚀过程产生的铁的氧化物与泥沙混合，大量附着于铁器表面，至使铁器表面形成大量结块，尤其是铁牛、铁人的面部由于泥沙等浮锈堆积，有的面目都难以认出。

2) 为了保护遗址面，曾在遗址面上堆积厚 50 厘米的一层沙，由于该地水位较高，铁牛、铁人腿部以下处于淹没状态，加速了这些部位的腐蚀速度，尤其 1、2 号铁人长期处于水没状态的腿部不断剥落变细，急需处理。

3) 由于泥沙淤积，遗址坝前区原来用以排水的沟已经淤平，雨水、地下渗水倒灌入遗址，遗址面已无法排干。

(5) 结论

铁器群所处环境十分恶劣，相对干湿度终年在 80% 以上，夏秋两季达 90% 以上，及时排水降低湿度仍属当务之急，权宜之计。

1997 年 3 月国家文物局批准确定铁牛等原位升高 12.2 米的保护方案。1999 年 10 月至 2000 年 4 月经过第二次发掘后，对铁器群分别进行了平移和原位抬升，改变了铁质文物的生存环境，使铁器群脱离了恶劣的环境，为下一步的保护创造出新的条件。对自然的影响应继续监测，以保证铁器群文物长期保护。

2. 化学保护方案确立的依据

中国历史博物馆负责地面上文物保护技术方案的确定、实施及分析检测方面的工作，从对铁器群现场及附近地区土壤、地下水、地面水、土壤湿度和地面水位周期性变化的考察、分析得知，地下水微显浑浊，偏咸；pH 为 7.92 ~ 8.30。

① 水中游离 CO_2 ：经现场检测，水中有相当数量的侵蚀性 CO_2 ，侵蚀性 CO_2 与氧共存时对铁器的侵蚀强烈。

② 耗氧量：14 ~ 37mg/L，大大高于标准水的耗氧量：10mg/L，说明水污染严重，水中厌氧菌——硫酸盐还原菌有相当高的菌量，对铁器造成危害。

③ 氯离子含量：415 ~ 514mg/L，生活水为 2 ~ 100mg/L，黄河水为 30mg/L。其氯离子含量高于黄河水十几倍，对铁器形成极大危害。

④ 总碱度：16.86me/L， HCO_3^- ：456 ~ 927mg/L，高出黄河水 162mg/L 五倍左右，造成游离 CO_2 的大量形成。

⑤ 硬度：19.40mg/L，为极硬水。水中的 Ca^{2+} ：134.67mg/L， Mg^{2+} ：141.06mg/L，高于黄河水 Ca^{2+} ：39.1mg/L， Mg^{2+} ：17.9mg/L 数倍。利于生成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的保护性沉淀。

⑥ SO_4^{2-} ：250 ~ 826mg/L，高于黄河水 82mg/L 数倍，其对缓蚀剂的影响类似氯化物。

⑦ 当地土壤为细沙土。

⑧ 铁器的锈层经 X 射线分析检测其成分为： $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}(\text{OH})$ 。

通过对环境和铁器保存现状的分析，可以看出铁器群所处的环境是极恶劣的，其对铁器群的危害是相当严重的。不过，我们也注意到由于其处于弱碱性环境，地下部分的腐蚀速率将不会很高，而地上部分则是因环境的突变，大气中的氧及酸性气体的侵蚀和残留在铁器表面土层和锈层中的有害因素，会导致铁器进一步的加速腐蚀。为减缓这种腐蚀，必须尽早进行保护处理。

从我们查阅的大量铁质文物保护的资料表明，目前在工业和文物保护界金属铁器的保护方法主要有：①酸性介质中缓蚀钝化处理；②碱性介质中缓蚀钝化处理；③低压氢等离子体还原法；④液氨保护处理法；⑤索氏洗涤处理法；⑥阳离子交换树脂法；⑦阴极保护法；⑧激光保护处理法；⑨化学还原洗涤法；⑩电解还原洗涤法；⑪涂层封护保护法，等等。

酸性介质中保护，采用磷酸、鞣酸等；碱性介质中保护，采用亚硝酸盐、磷酸盐、钼酸盐、铬酸盐、倍半碳酸盐及 BTa 等。

一般来说，在实际应用时都是几种方法组合使用。但是就各种方法作用的原理，可分为两大类：一类为洗涤还原去除铁器上的有害锈蚀；另一类为铁器的钝化缓蚀处理。铁器上的有害锈蚀主要是指铁器上的氯化物（如羟氯化铁、二价三价铁的氯络离子等）和铁器上的酥松锈蚀（如铁的氢氧化物等）。而铁器的钝化缓蚀处理是指通过化学方法在铁器的表面形成一层致密的保护膜。对文物的处理和工业上不同的是所形成的保护膜不能影响文物的质感和外观。

因为铸铁更适宜于保护在碱性环境下，且蒲津渡遗址铁器群实际处于弱碱性环境中，若选用酸性试剂如磷酸，那么由于磷酸钙等的沉积将影响铁器表面络合物的完全形成，反而易加速铁器的腐蚀。另外，从实验室所作的磷酸加鞣酸方法和碱性方法的对照试验结果亦证明，对于铸铁，碱性环

境要优于酸性介质环境。

在碱性介质的选择中，有以亚硝酸钠为主，另外还有钼酸盐、铬酸盐及混合盐的协同作用等。经筛选比较后，我们确认以亚硝酸盐为主，辅以其他盐类之法效果最佳。

具体处理过程如下：

首先以机械剔除器物表面的松锈、土垢；再以大量的蒸馏水冲洗（自来水中含有大量对铁器有害的离子），为防止蒸馏水对铁器的腐蚀（实验证明蒸馏水对铸铁的腐蚀亦较严重），要加入 0.4% 的亚硝酸盐，并在冲洗后强制干燥。在冲洗过程中，以化学还原法实施脱盐，同时监测洗涤液中氯离子含量的变化，待清洗彻底后，强制吹风脱水，等完全干燥后再涂布缓蚀剂。

缓蚀剂配方为亚硝酸钠 20%，铬酸钾 1%，酸钠 5%，并辅之以甲基纤维素、高分子吸水材料和细锯末粉为附着剂。

此配方经实验室在新、旧铁器、铸铁试样及铁质文物上作过的试验和加速腐蚀试验后，保护效果优良，其对铁质文物外观、颜色基本无影响，完全符合对铁质文物保护处理的要求。

值得一提的是，无论采用何种配方缓蚀，其缓蚀前的脱盐与干燥问题都是十分重要的。

综上所述，将蒲津渡遗址铁牛群整体提高的最新保护方案使得铁牛群长久、安全得到保护成为可能，简易了保护操作难度，并使铁牛群地上、地下部分的保护合为一体。通过实验室分析，实验所制订的具体化学保护方案为：①表面机械保护处理；②化学洗涤除有害离子；③化学缓蚀处理；④渗透加固处理；⑤表面处理。经实验和实际操作的检验证明，以上方法是切实可行的。

3. 电化学保护方案确立的依据

北京科技大学负责铁质文物地下部分电化学的保护方案的确定，实施及分析检测方面的工作。经检测确定铁器群主要铁件的成分为低硫低硅灰口铁。

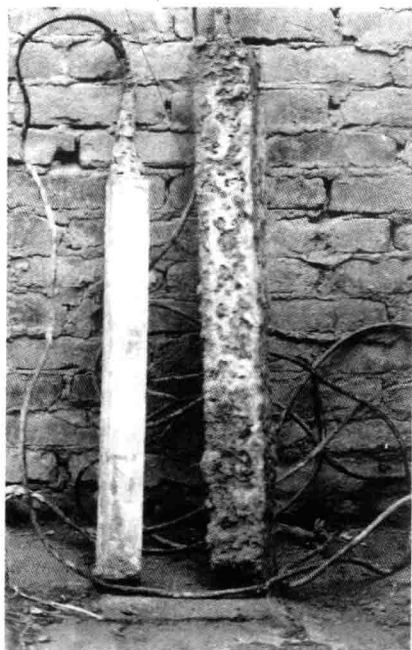
(1) 实验室内的前期实验研究结果

根据实验室内的前期研究和分析结果，基本了解了蒲津渡遗址区域内铁质文物的材料性质、腐蚀状况，以及金属腐蚀锈层及沙土锈的形成规律等。特别是研究掌握了带有较厚沙土锈铸铁与裸表面铸铁之间不同的腐蚀规律和阴极保护规律。确定了带锈铸铁完全被保护时所需的稳态保护电流密度的数值范围（明显大于裸表面铸铁所需电流），并探知了带锈铸铁被保护的初期所需时间也相对更长，需要的电流更大；研究了在模拟土壤中电化学阴极保护对带锈铸铁的保护作用，以及对铁质表面颜色及锈层是否有影响；等等。

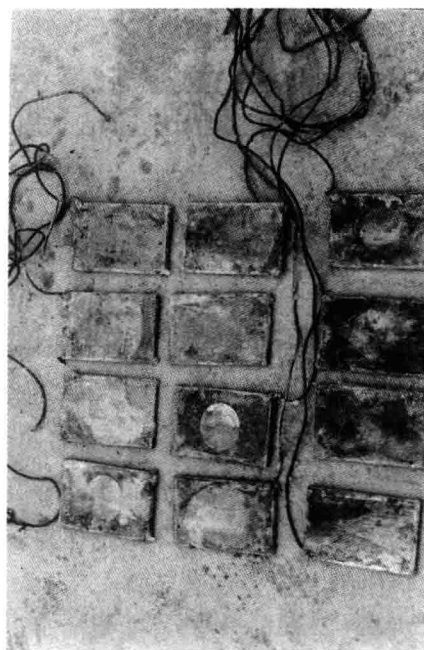
(2) 现场保护的前期试验研究结果

同期，还在现场进行了相关的检测和实验研究。并根据实验室内的研究结果，在蒲津渡遗址区域附近的土壤中进行了模拟铁质文物的带锈铸铁现场保护实验研究。在现场土壤中，模拟文物铸铁样品的镁合金牺牲阳极和锌合金牺牲阳极的阴极保护试验。

阳极棒经过 5 年埋藏试验，图一四一左为镁阳极腐蚀较轻，右为锌阳极腐蚀较重。图一四二为试片埋藏后效果。这一方案实施后。地上部分将会大大延缓其腐蚀速度；地下部分将得到保护，第一次镁阳极可以使用 15 年以上，以后只要按时更换阳极，可得到永久性保护。当地下部分实施后，如果地上部分经历潮湿、水浸环境，阳极保护装置自动对地上部分起到一定的保护作用。



图一四一 现场实验后镁阳极和锌阳极棒



图一四二 现场实验后被牺牲阳极保护的模拟铸铁文物的试片

(3) 专家论证会结论

在现场和实验室检测、试验、分析研究的基础上，本项目组提出了蒲津渡遗址现场铁质文物保护方案（地下部分）交由文物保护专家进行评审。国家文物局也于1996年2月12日召开了国家文物局文物保护专家组对该保护方案进行了认真地评审和论证。2004年2月25日国家文物局委托中国文物信息咨询中心对保护工程方案和铁质文物保护方案进行了论证。原则同意了保护工程方案。

在认真听取了项目组的研究报告和保护方案后，文物局领导和各位专家们还仔细地询问了阴极保护的原理、模拟文物铸铁样品在现场的阴极保护效果，以及现场实施的可行性。会上，专家们还反复查看了现场取回的被阴极保护和未被保护的铸铁对比样品：被电化学阴极保护的样品，在埋入地下几年后取出，表面仍是光亮如初，表面上当初机械加工时留下的痕迹仍清晰可见；而作为对比的未被保护的样品却锈蚀严重。

经过评审，专家们最终认为：现代工业界正在普遍使用的阴极保护技术，对于埋于地下的古代铁质文物的保护也完全适用，效果非常好。因此，论证会作出决定：蒲津渡遗址铁质文物埋地部分的现场保护应采用电化学阴极保护技术。

(4) 蒲津渡遗址现场地下部分的建筑规划和设计思想

2002年5月在国家文物局委托中国工程院召集的对蒲津渡遗址保护工程方案咨询会上，专家们提出建议：蒲津渡遗址现场的建筑方案应将先前的原位提升、下部重新掩埋的设计方案进行修改。作为古代著名的蒲津渡浮桥锚柱的工程遗物，它的意义价值与普通的镇水铁牛不可同日而语，它是重要的桥梁科学遗物，铁牛下部的锚柱也应展出让人参观，即，四个铁牛原位提升后，北侧前后两

个牛的下部仍将按原设计用级配砂重新掩埋；由钢筋混凝土围墙将级配砂围住，并支撑着上部的铁牛基座（围墙南北跨度8米左右）。而南侧两个牛的下方将建一个地下室，铁牛下部的锚柱将穿过地下室的混凝土顶板，斜向伸进地下室内以便展出。四个铁人及七根铁柱（七星柱）的下部仍将用级配砂直接掩埋。

4. 铁质文物现场保护应遵循的原则

国家文物局早在1992年就已确定了“原地、原位、原貌保护”的方针。但由于文物出土时的水平面高度远远低于距离不远的黄河水平面，地下水经常淹没铁牛等文物，使得现场环境条件非常恶劣。因此，国家文物局同意了将整个遗址平面原地提升、原貌复原的保护方案。根据国家文物局的指示精神，本课题组认为，蒲津渡遗址现场铁质文物的保护应该遵循以下几项原则：

- ① 原貌保护的原则。无论采用何种保护方法，都应以不改变文物的外观和形貌为前提。
- ② 采用的保护方法不仅不应损伤和破坏文物的表面，更应达到使外层铁锈内的基体得到完全保护、控制腐蚀的继续发展的目的。
- ③ 采用的保护方法不应是永久的（但可持续）、不可逆转的、不可替代的。应该给未来可能产生的更先进、更好的保护技术，留有可施展的空间。
- ④ 采用的保护方法应对周围的环境无污染。
- ⑤ 不能采用可形成较厚覆盖膜的保护方法；最好采用可渗透外锈层到达基体表面的水溶性缓蚀剂，憎水、透气、无毒、无膜（或凝固时间长、成膜较薄、透明、无色、无光泽）。
- ⑥ 保护方案中，此次牺牲阳极的保护设计年限为15~20年以上。

七、保护方案实施结果

根据以上的各项依据和保护原则，确立了本保护方案。保护方案可根据铁质文物周围的环境不同分为两大部分：保护工程对环境的改善；对铁器群铁质文物的直接保护。铁质文物保护又分为地上表面部分和地下埋藏部分。地下部分又可分为与土壤直接接触的埋地部分和与空气直接接触的地下室部分。

1. 现场保护的环境条件

宏观环境：蒲津渡遗址铁器群为黄河浮桥桥头之构件，因黄河河道变迁泥沙淤积才深埋于地下，因此出土后其位置比现今黄河水面低6米左右，近年虽然由于干旱水位降低，自2000年4月经过第二次考古发掘后，基本搞清了遗址的地层后，对铁器群进行了原位抬高和暂时移位搬迁。使铁器群脱离水浸状态。再加上铁牛抬高出地表，彻底摆脱水浸。

理化生环境：通过对铁器群上铁锈、铁器附近土壤、地下水、地表水、黄河水样的对比分析得知：铁牛所处的环境中 Cl^- 高出黄河水十几倍， SO_4^{2-} 高出数倍， HCO_3^- 高出五倍，这些有害离子对铁器群产生很强腐蚀作用。浅层水氯离子含量严重超标，对铁器有较大的威胁。

2002~2004年当地雨水测试pH在6左右（表一五），对铁质文物影响不大。

表一五 2002年9月10日采集蒲津渡遗址雨水分析（永济市环保监测站检测分析）

Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	pH
20.8	2.84	15	2.81	1.21	5.6

生物环境：土壤有害菌异养细菌和铁细菌的含量很高，分别达 10^6 个/克土， 10^5 个/克土，中性硫化细菌也很高，尤其是硫酸盐还原菌也达 $10^5 \sim 10^6$ /克土，这些菌对金属腐蚀起相当重要作用。

（1）相对环境的改变

遗址平台在原遗址面层抬高12.2米。现今现场地表海拔337.5米，加上黄河滩永济段预测百年淤洪量1米为338.5米，铁牛锚柱长约3.8米，所以从原发现位置326.3米抬升12.2米达到保护工程预计高度。平台的填料采用3:7灰土，用传统方式夯实围护，中心2:8灰土垫实碾压混成一体。外侧用青石维护。填高5米。表面做10厘米水泥砂（近土色）。上部复原按考古发掘揭示的明代渡口遗址面复原：卵石铺砌的路面和铁牛周围石砌遗址面，明代石堤坝，金元房屋遗迹，七星状排列铁柱，明正德十六年石碑等。

围栏采用青石护栏望板，高90厘米，厚12厘米，东、南、北三边封闭，西边与参观平台、台阶相接。平台明水流畅，不积水，护栏边留排水孔。

关于牛箱设计，基础部分从发掘部位到地表10米有余用碎石填充。在支护铁牛钢架顶升过程中，对下部压实起了一定作用，尤其是在千斤顶部位，不断的承压移动使填充碎石得到一定挤压；在顶升至现今位置已经三年的时间，未发现稍有大的变形移动。

牛箱下部是自古以来的黄河岸边，为轻亚黏土土质。周边为古代处理加固的地基，北、东、南均有大石块围护，宽度约3米，厚积三层石块，约50厘米。西边为明代堤坝，砂石条块堆砌，约存3米高，其上部条石被编号拆除，平台工程完成，复原地表明代遗迹面。

牛箱体地基承载力经山西省第八地质工程勘察院120kg超重型动力触探测试，确定经处理后砂石垫层为不液化层，牛箱区承载特征值大于348kPa。可以承载牛箱的制作和上部荷载。

平台范围承载特征值大于240kPa。

牛箱体积分为两组：1、2号牛为北组，内径14米×8米×5.4米。3、4号牛为南组，内径14米×8米×5.4米。

牛箱体厚度40厘米。下部封底，以利于牛箱内干度条件的自然调节（为牛箱的整体性考虑，做满堂红砼基础）。

牛箱地基为级配碎石填充。

牛箱应为独立个体，不应与参观平台连体。独立有益于铁牛的保护，不会因参观平台基础与牛箱基础的不同而发生不均匀沉降引起分裂。

牛箱基础位于河岸之上，土质为轻亚黏土，而参观平台的位置在古河床中，土质为粉砂。两者相连接部位是两种土质分界部位，基本压于明代堤坝位置。

1、2号铁牛下部锚桩将采用电化学保护方式。为检测与控制便利，在两牛箱相邻部位留出若干可通导线的孔洞，用塑钢管相连，以利回填土时加置保护设施。3、4号牛箱北部可置留一个200厘米×9厘米的窠洞，以利保护设施置放和检测。

3、4号牛箱预留照明、检测线路管道。

(2) 牛箱内钢梁的置换

1) 铁牛材料的机械性能和顶升

本材料系低硫低硅灰口铁，但灰口铁的种类也较多，按我国 gP—976—67 灰口铁性能标准，灰口铁抗拉强度 f_e 为 $\geq 10\text{kg}/\text{mm}^2$ ，（即 $f_e \geq 100\text{mPa}$ ），因此本工程取 98mPa ，采用千斤顶上升时，可以严格控制行程，保证几点上升时同步，因此其差异变形也可以保持相当小。千斤顶“满行程”后的换撑。每一点加力点可有两个千斤顶的位置，即在换撑前，待梁架下部用板材加垫支撑，用另一附近的备用千斤顶临时加撑，以木板垫受力，取下原千斤顶，这样逐步换撑的办法，以保证在千斤顶调幅时应力重分布不至太大而引起裂缝。提升铁牛保证加提升点的位移差在最小范围内。在加载状态时，保持加载速度以安全稳妥为准，确保万无一失。

2) 关于局部受压强度的复核

铁牛技术资料先设立局部受压施加荷载为 15T ，系面荷载，以三点受力为考虑的原则，按此计算，最大荷载为 75.9T ，即每点应为 25T 左右，最小以 56.8T 即每点受载约 19 吨，均 $\geq 15\text{T}$ 。因此其取载 15T 。调整为按 25 吨计，其每点受压面积（按安全度考虑）最小支承面积为 $25 \times 9800/64 = 38$ 平方厘米。为确保其支承面均有效，在钢梁上加设枕木，枕木宽度宜 ≥ 15 厘米，以使其受载时，枕木可以使应力塑性分布，避免局部应力集中。而钢架的设计中，其横梁跨中，各应力点与支柱的相对挠度，也控制到越小越好（荷载按西荷三之受力计算）。

“铁牛”的顶升是一件十分细致的工程，构件的断面也不清楚（牛肚和柱桩的详细资料不清楚），因此很难用事先计算来控制其应力状态。在顶升和 3 年多放置的过程中梁架起到了重要的作用。

钢梁的设置对于顶升铁牛起到了安全保护的作用，但到位后铁牛对梁架的依赖又给保护中钢梁的置换带来隐患。在置换的过程中采取了极其稳妥的办法：对于锚柱下部发生变化的用钢梁交换支撑替换原梁架；其他则用上部支撑和下部木板垫支逐步割除支架。保证牛的变化在最小范围，成功换置钢梁架。

(3) “软着陆”的实施

“软着陆”分为两部分：其一，钢骨混凝土梁在牛体底板平托；其二，牛下锚桩的稳定加固，采用双保险的办法稳固铁牛。

在完成牛箱基础上，进行铁牛顶升到位，按发掘出土面貌复位，以牛箱为依托支撑，横向设置梁架，利用梁架，加工变换为以托置铁牛底板为骨架的固定梁架，置稳固铁牛。割除铁牛下部支架，形成与考古发掘过程中支护铁牛格局。保证铁牛的稳固后，对其下部进行填埋，拟采用材料和操作方式的两种形式配合完成：

1) 采用级配砂方式填置大部

牛下锚桩在上部支护稳后，为避免空吊，造成斜桩断裂隐患，应采用锚桩顶端部位垫枕木支护。六根锚分别处理，垫实即可，不允许加强支撑。

用级配砂填 15 厘米后震动捣实，要保证均匀。之后在 $336.4 \sim 341.4$ 米均采用分层填置震动方式完成填实。牛箱底部封底。

这样的优点是，均匀、密实，对文物无损伤，保证锚桩均匀受力。但也有缺点，级配砂 15 厘

米振捣操作无规范，沉积不均匀。

2) 采用灰土夯填方式填置锚柱周围

铁牛上部支护完成稳固，锚桩顶端用枕木垫支到位，锚柱周边 30 厘米采用 3:7 灰土，即 3 成白灰，7 成素土，人工搅拌均匀。

填充夯实：336.4 ~ 341.6 米，每 30 厘米一层，均匀铺好，用人工加机械夯实。锚桩间隙用直径 5 厘米木棍捣实。每 50 厘米高度应检测一次（若干点）。

其优点是，灰土垫层成功经验多，便于操作检测。灰土既密实又干燥，尤其是白灰对铁器的锈蚀有一定抑制作用。但缺点是，其均匀性不如水沉砂，锚桩间隙不易均匀填实，尤其在有冶炼铸造遗痕需保留的部位，更为困难。

3) 采取补充措施，在锚桩间歇采用级配砂填充。

1、2 号牛箱填充高度 341.6 米。3、4 号牛箱内填充高度 339.2 米，锚桩下部埋深 1 米。

以上方式将牛箱填充到位时，铁牛都应当是受力均匀，锚桩稳固。上部支撑的钢架已可以安全拆除。牛底板下的钢骨混凝土底梁可以放心安全地制作。

在支模前将重载钢轨放置到位，在钢轨与牛底板间加入经沥青煮浸的榆木质垫木，要尽量垫实。支模完成后灌入混凝土，在未凝固前撤除原钢梁，允许铁牛在相当小的范围内有一定沉降，以钢轨为底，垫木支撑，混凝土围护，使牛底板与钢骨梁接触面更均匀，“软着陆”完成。

需要强调的是，为保证铁质文物的安全、稳妥，考虑到施工现场水质中含氯离子对铁质文物的不利影响，听取专家意见，特意在制作铁牛周围混凝土的用水时，使用的是从较远距离取的深井水，以降低现场水质对铁质文物的不利影响。

2. 地上部分化学保护方案的实施

蒲津渡遗址抢救性保护课题自 1993 年展开以来，对遗址区的环境、土壤、地下水及土壤中的腐蚀微生物进行了全面的检测、分析，并根据分析和实验室模拟实验的结果制定了前期保护方案。1994 年秋天对 4 号牛实施了保护措施。1996 年我们继续完成了部分实验室的定性、定量实验工作。蒲津渡遗址铁牛群整体提高的保护方案，这是从根本上解决黄河地下水害的方法，使文物脱离恶劣的地下环境，对文物的科学保护工作十分有利；同时它也解决了地上、地下接点保护上的难题，使整体保护工作更易操作、进行，还节省了大量的人力和物力。

中国历史博物馆负责地面上文物保护技术方案的确定、实施及分析检测方面的工作。同时，对中国历史博物馆端门十二门铸铁铁炮进行保护处理，以积累经验。几年的风风雨雨证明，我们所设计的地上实行化学处理保护方案思路是正确的，通过对方案和实施步骤的进一步改进，可以确保其对大型铸铁器物有较强的实施性并具有明显直观的处理效果。

通过环境分析与铁器保存现状看，虽然从分析中得知在土壤和地下水中铁细菌、硫酸盐还原菌和氯化物成分比较高，但是由于铁器处在碱性环境中，因此地下部分铁器的腐蚀速率不应很高。现在的变化，主要是因为文物出土后保存环境突变，大量氧气的侵入和大气风化的结果。

2002 年后对现场环境、自然条件再做调查分析，2004 年实施保护中对现场条件实施监测，以掌握自然条件变化（图一四三、一四四）。