



美国旧金山新海湾大桥 钢结构制作技术

上海振华重工(集团)股份有限公司 编著



中国建筑工业出版社



美国旧金山新海湾大桥 钢结构制作技术

上海振华重工(集团)股份有限公司 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

美国旧金山新海湾大桥钢结构制作技术/上海振华重工(集团)股份有限公司编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013.10

ISBN 978-7-112-15994-9

I. ①美… II. ①上… III. ①悬索桥—桥梁结构—钢结构—旧金山 IV. ①U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第246119号

责任编辑: 徐 纺 徐明怡

美国旧金山新海湾大桥钢结构制作技术

上海振华重工(集团)股份有限公司 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

上海鸿速印刷有限公司制版

上海鸿速印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 25 $\frac{1}{4}$ 字数: 614千字

2013年11月第一版 2013年11月第一次印刷

定价: 118.00元

ISBN 978-7-112-15994-9

(24787)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



在建的旧金山新海湾大桥



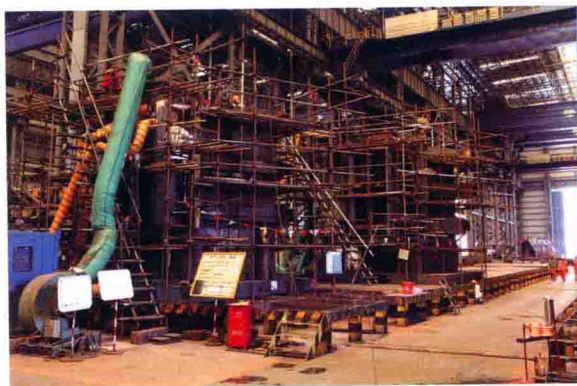
完工仪式



完工仪式



美国旧金山新海湾桥钢塔



赶制钢塔



钢塔铣边



钢塔加工



钢塔吊装



8E吊装



钢桥监理检查



施工场景



施工场景

序 言

2007年3月,我应好友余安东教授之邀,参加当时的振华港机(后改为振华重工)总裁管彤贤先生的宴请。席间,管总向我介绍了他们企业发展的情况和前景,并兴奋地告诉我振华在激烈的国际竞标中获得了美国旧金山新海湾大桥全部钢结构制造共4.5万吨的任务。他表示从余安东教授的介绍中知道我在钢桥领域的经验,希望我能关心此事,协助钢桥制造技术总结一书的编写工作。余安东教授在德国著名土木工程企业Hochtief工作多年,了解国外技术总结的模式,也愿意参与策划和编审定稿的工作。我一直希望交通部有一个钢桥制造基地,振华港机虽然在经验上与历史悠久的铁道部下属的中铁山海关桥梁厂和宝鸡桥梁厂以及中船总公司下属的各船厂相比起步较晚,但我感到振华向桥梁钢结构领域拓展的决心很大,再加上盛情难却,表示可以考虑合作做一些工作。管总当即决定立一技术服务课题,由同济大学桥梁工程系组织一个小组,并邀请余安东教授担任顾问参与总结的编写工作。2007年6月,双方正式签订了合约,我们随后就第一次去长兴岛振华基地考察了振华的技术装备和制造条件。

由美国著名的林同炎国际(TY Lin International)设计的旧金山新海湾大桥(东段)是一个富有创意的优秀设计,1998年即已基本上完成设计工作,很早就在国际会议上作了介绍,得到了国际同行的普遍好评。尤其是在抗震塔上采用了四个分塔柱和十道剪力连接件所组成的“灾变控制”理念以保证其能抵抗旧金山8.5级的强震,以及自锚式悬索桥体系所采用的“环绕式锚固系统”都是国际上首创的构造形式。然而,这也同时带来了制造工艺上的较高难度,振华港机作为一支年轻的钢桥制造队伍,面临着极大的挑战。

在第一次考察中,我就提出了两点建议:(1)和我参观过的山桥和宝桥相比,振华的制造装备尚有不足,需要添置一些先进的设备,以适应高难度的制造工艺。(2)振华的队伍比较年轻,经验可能不足,如有可能,可从铁道部企业聘请一些退休的老工程师担任顾问和监理工作,帮助把关。虽然经多方努力,此事并未如愿。

2007年至2008年是振华的准备期,它们投入不菲的资金建成了专门的车间,安装了必要的设备,生产出了第一批样段,经美方检查发现了一些需要改进的问题。由于该桥位于强震区,美方要求用高于一般建筑钢结构规范制造部件以保证桥梁的抗震能力,因而对焊接的质量控制十分严格。振华的团队决定迎难而上,接受挑战,进一步调整工艺,重新组织生产。2008年至2009年间,振华经历了一年多的

磨难，在美方派出技术人员的帮助下，攻克了许多难点，也锻炼了队伍，终于制造出了符合要求的合格产品，得到了美方总承包单位的认可。2009年12月，经过验收的第一船部件正式启运。

2010年4月，为了澄清外界和业内同行对振华团队所经历磨难的种种传言，振华团队和美方监理决定召开一次汇报研讨会，用事实向业界和媒体说明他们作为一个钢桥制造界的年轻团队，通过两年的磨炼已渡过了难关，成功制造出高质量的产品，并已掌握了国际先进的技术，上了一个新的台阶。当时，已改名的“振华重工”成为中国交通部旗下第一支钢结构和钢桥制造基地，终于实现了管总的宿愿。

此后的一年，振华不仅按严格的工艺要求圆满地完成了全桥的部件制造，美方还将安装主梁的钢结构临时支架任务也交给振华重工。2011年7月，为庆祝最后一轮钢箱梁的启运，振华重工举行了盛大的庆典活动。美国旧金山市政府官员、市政当局的项目业主代表、总承包公司的领导均莅临上海长兴岛基地，发表了热情洋溢的讲话，祝贺中国振华重工的成功，并表示要对振华团队的出色成绩给予奖励，充分显示出美方的满意心情和对振华的高度赞赏。

最后，我在对振华重工表示钦佩之余，还想说一点希望：

中央已认识到中国装备工业落后对工业现代化的制约，明确提出了加快发展现代装备制造业的号召。振华重工经历了磨难，提高了技术水平，培养和锻炼了一支队伍，是最宝贵的收获。希望振华继续努力，在今后的大桥建设中发挥主力作用，创造中国一流品牌，走向世界。

振华的主业是港机，其产品已在世界各国取得了很高信誉，希望以此为基础向基建装备工业发展，生产出高水平的各类吊机（如浮吊、塔吊、桥面吊等）和各类大型施工装备（如钻机和盾构机等），成为中国装备工业的领军企业，以改变目前大型施工装备依赖进口的局面。为此，必须攻克瓶颈，掌握核心技术，解决国产装备工效低、耐久性差、可靠性不足的问题。衷心期待振华重工在中国走向装备业强国的征程中作出更大的贡献。

中国工程院院士
同济大学荣誉资深教授
项海帆
2012年12月

前言

旧金山新海湾大桥是全球最大跨度的单塔自锚抗震悬索钢结构桥梁,被誉为世界同类钢结构桥梁中最复杂、技术难度最高、造价最贵的钢桥项目。高度为 151m、重量达 1.3 万 t 的单塔柱支撑全桥重量 7 万多 t,居世界同类桥梁之首;抗震 8 级,居世界桥梁抗震之首;双向 12 车道,中间一条自行车专用车道,桥面宽达 70m,居世界单塔桥梁之首;是旧金山与奥克兰之间不可或缺的关键通道,日均车流量达 30 万辆之多,居世界桥梁通车能力之首。正是这些世界第一,也让这座大桥成为业界公认的同类桥梁中技术难度最高的项目。此桥也成为与美国东海岸自由女神像比肩的地标性建筑。

旧金山新海湾大桥的钢结构于 2006 年订立合同,于 2011 年 7 月 11 日完成制作,并于 2013 年建成通车。

在旧金山新海湾大桥通车之际,我们编写出版《美国旧金山新海湾大桥钢结构制作技术》一书,概括了钢塔和钢箱梁的特点及应用,系统的介绍了钢塔和钢箱梁的制造、科研的经验及技术成果。

全书分四篇共二十一章。第一篇工程概况,包括工程背景、结构特色、项目情况;第二篇钢塔制作技术;第三篇钢箱梁制造技术;第四篇结束语。

本书编写的分工为,第一篇主要由钢构公司编写;第二篇及第三篇中的第一章至第七章由振华重工长兴分公司编写;第三篇第七章第八节由质量监督部编写;第三篇第八章由工艺部编写;第三篇第九章由船运设计部编写。

在美国旧金山新海湾大桥项目组成立之初,原振华重工总裁管彤贤先生提出,“在努力完成一个举世瞩目的伟大工程的同时,我们要想办法培养一批人才,并且要把我们的宝贵经验留下来”。因此在项目进展过程中,一直不断总结编写。在此特别感谢中国工程院院士、同济大学荣誉资深教授项海帆先生的大力支持,也感谢余安东教授等专家的多次帮助。

本书主要内容的收集工作由陆汶玉同志协助完成,并经振华重工副总裁黄红雨、副总工艺师陆汉忠校勘。文字编排由席梅香等完成。在编制期间也得到了长兴分公司李森总工艺师、沈大明总工程师的大力支持。振华重工的主要编制人员(以姓氏笔划为序)有王永田、牛铁峰、付俊、朱建国、李江华、李俊、陆汉忠、陆世华、陆汶玉、陆建华、陆鑫、杜渝、余良辉、吴正峰、吴韵、宋雪曙、苏红亚、邹继祥、杨琦、贺绍峰、张今冬、张志勇、凌世华、顾新寨、唐永波、耿爱军、钱燕燕、曹凤丽、蒋荣彬、满利义等,在此一并致以谢意。

希望该书不仅给公司,也能给国内外钢结构生产同行有所裨益。

上海振华重工董事长 宋海良

2013 年 6 月

CONTENTS 目录

序
前 言

第一篇	工程概况	
第一章	工程背景	002
第二章	结构特色	006
第三章	项目情况	010
第二篇	钢塔制作技术	
第一章	钢塔制作的要点	014
	第一节 钢塔基本构造	014
	第二节 钢塔制作要点	017
第二章	钢塔总体制作方案	019
	第一节 钢塔制作工艺流程	019
	第二节 节段划分方法	019
	第三节 关键工艺	021
第三章	钢塔制作精度要求和管理	025
	第一节 概述	025
	第二节 面板单元的制作要求和管理	025
	第三节 横隔板单元的制作要求和管理	027
	第四节 箱体制作要求和管理	028
	第五节 箱体拼装要求和管理	029
	第六节 箱体端面机加工要求和管理	030
第四章	钢塔焊接技术要求和管理	033
	第一节 焊接工艺评定方法	033
	第二节 焊接工艺评定试验	034
	第三节 钢塔厚板焊接技术要求和管理	039
第五章	钢塔节段模型制作	045
	第一节 10m 节段模型	045
	第二节 77m 节段模型	054
	第三节 89m 节段模型	055
	第四节 114m 节段模型	062
第六章	钢塔吊装段制作	067
	第一节 概述	067
	第二节 钢索塔节段主要制造工艺方案	069
	第三节 钢板预处理、下料	071

第四节	板单元制造	075
第五节	横隔板单元制造	086
第六节	连系横梁制造	096
第七节	十字撑杆制造	105
第八节	塔锚座制造	108
第九节	鞍座格床制造	123
第十节	检测与验收	146
第七章	钢塔吊装段端面机加工	157
第一节	概述	157
第二节	端面机加工流程	157
第三节	塔柱端面机加工工艺	158
第八章	钢塔吊装段预拼装	164
第一节	概述	164
第二节	钢塔预拼装工艺流程	165
第三节	钢塔吊装段预拼装工艺	167
第四节	横梁预拼装工艺	181
第五节	十字撑杆预拼装工艺	186
第六节	塔锚座预拼装工艺	190
第七节	鞍座格床预拼装工艺	194
第九章	钢塔吊装段的起重运输	201
第一节	概述	201
第二节	板单元起重运输	202
第三节	钢塔吊装段起重运输方案	207

第三篇 钢箱梁制作技术

第一章	钢箱梁制作的要点	214
第二章	钢箱梁总体制作方案	218
第三章	钢箱梁制作精度要求和管理	223
第一节	概述	223
第二节	钢箱梁的精度要求和管理	223
第四章	钢箱梁焊接技术要求和管理	232
第五章	桥面板模型制作	239
第一节	材料检查	239

	第二节	预处理	239
	第三节	U 肋制作	240
	第四节	板单元装配	243
	第五节	板单元翻身	246
	第六节	气密性测试试验	246
第六章		钢箱梁技术准备	248
	第一节	焊接工艺评定	248
	第二节	制作工艺准备	259
	第三节	U 肋折弯试验	265
	第四节	U 肋板单元焊接试验	266
	第五节	U 肋板单元焊接反变形试验	274
第七章		钢箱梁制作	277
	第一节	验收及公差要求	277
	第二节	工装、设备及车间布置	296
	第三节	板单元制作	305
	第四节	连系横梁制作	312
	第五节	钢箱梁制作	316
	第六节	节段预拼装及吊装段制作	325
	第七节	节段及大节段的转运方案	338
	第八节	检测和验收	340
第八章		涂装技术	353
	第一节	防腐涂装体系	353
	第二节	涂装工艺	355
	第三节	涂装施工	358
	第四节	涂装质量控制	364
	第五节	涂层检验	359
	第六节	涂装安全及环境	366
第九章		船运技术	368

第四篇 结束语

本项目的制造优点与创新点

第一篇 工程概况

第一章 工程背景

一、建设立项过程

在美国加州海湾地区,连接旧金山与东侧奥克兰市和伯克利市的老海湾大桥是一座由悬索桥和桁架桥组成的双层高速公路钢桥,建成于1934年。

西部主桥为双联354m+704m+354m钢悬索桥,中间设共同锚碇。悬索桥设双索,索间距为20.1m,塔高139.6m,加劲桁架梁高9.1m。桥身为上下两层,上层中间为17.7m车道,两侧各0.9m人行道,桥面为清混凝土;下层亦为17.7m车道,两侧各0.6m检修通道,桥面为混凝土。东部主桥为钢悬臂桁架,跨径为155m+427m+156m。

1989年10月,旧金山海湾地区发生黑山(Loma Prieta)里氏7.2级地震,严重损坏了大桥东段的结构,一块长约15m的桥面从上层塌落,掉至下层桥面,造成一人死亡,大桥被迫关闭一个月。1994年,旧金山北岭发生里氏6.7级地震,该桥的桁架桥再一次遭到了破坏,经多次修复,大桥继续维持交通至今。

大桥日交通量达28万辆,是十分繁忙的收费桥梁。桥梁位于两大断层(San Andreas 和 Hayward Faults)之间,震害表明:旧桥的抗震能力不足,难以抵御可能再次发生的强烈地震。

1997年2月,加州运输局(Caltrans)决定重建桥梁的东段,即连接香叶岛(Yerba Buena Island)和屋仑(Oakland)的区段,如图1.1-1所示。1997年7月,负责湾区交通规划及融资的都市交通委员会(MTC)就新海湾大桥的设计向加州运输局提交了东段桥梁的两个建议方案:斜拉桥方案和自锚式悬索桥方案。

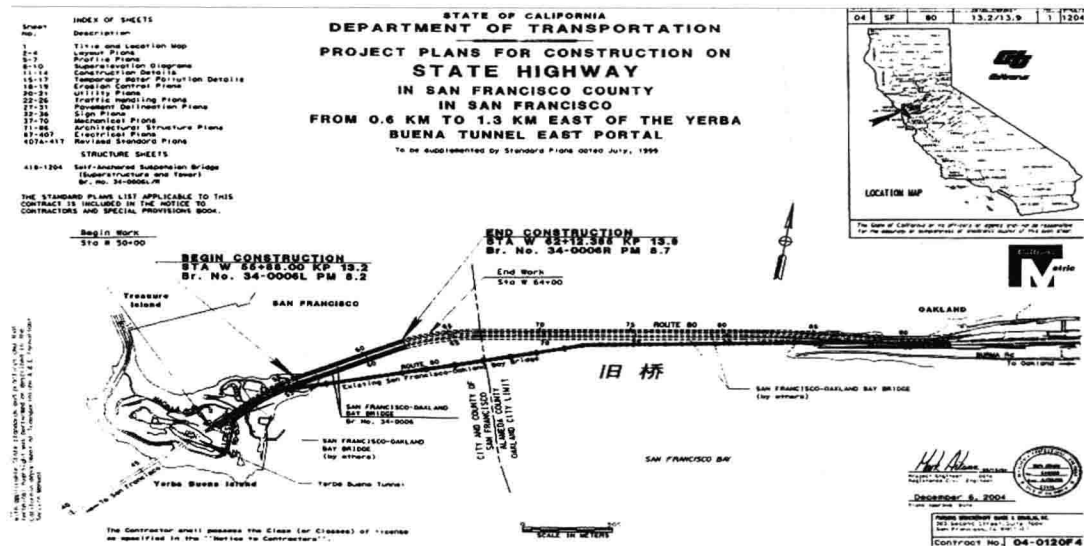


图 1.1-1 平面线路图

1997年11月,加州运输局正式委托旧金山的林同炎国际公司(T. Y. Lin International)和洛杉矶的Moffatt & Nicliol公司共同负责设计新海湾大桥。工程性和经济性报告分析,重新建造一座桥,比整修旧桥也就贵几亿美元,但可以提供更长使用寿命——75年到100年,而整修只能再维持30年,并且新桥的维护费用要远低于旧桥。1998年7月,都市交通委员会经过讨论,表决通过选用自锚式独塔悬索桥方案,并决定于2001年动工建造。

1999年2月,驻有香叶岛的海军基地又反对原定线路并阻碍在岛上进行地质钻探,致使开工日期被迫拖延。直至2000年10月,经过交涉,海军同意把香叶岛交给加州运输局使用,才开始工程地质钻探,并于2001年打下第一根试桩。2002年1月,新海湾大桥举行了开工典礼,造价从原来的15亿美元增加至26亿美元,并希望能在2006年竣工通车。2002年后,由于加州州长换届以及其他政治和融资方面的原因,工期被一再推迟。

2004年,加州交通部开始为重建海湾大桥项目招标,美国AB公司、NS Bridge公司和美国Fluor公司组成的联营体5月递交了重建方案。在2005年6月,执政者、立法机关、加州交通部以及海湾地区的政客们终于达成了一致,决定以提高过桥费的形式弥补建桥成本的提高。10月,加州交通部再次对该项目进行了招标,有两家联营体参与竞标,AB公司仍然和美国fluor集团组成的联营体以14.34亿美元,略低于加州交通部调整后工程概算的价格中标该项目。

二、桥型选择

1859年,奥地利工程师Langer第一次提出自锚式悬索桥的设想,但美国工程师Bender于1867年抢先申请了专利。1870年,Langer在波兰率先建成了世界第一座小跨度的试验桥,成为第一位自锚式悬索桥的实践者。1915年,德国工程师在建造跨越莱茵河的科隆Köln-Deutz桥(如图1.1-2所示)时,因美学考虑希望选择悬索桥方案,但由于软土地基不宜建造锚碇,最后决定采用自锚式悬索桥,主跨184.5m的该桥取得了成功,在国际上产生了很大的影响。



图 1.1-2 Köln-Deutz 桥



图 1.1-3 美国 Pittsburgh 桥

1925~1928年间,美国匹斯堡市(Pittsburg)接连建造了三座类似的跨越Allegheny河的自锚式悬索桥(如图1.1-3),主跨为131~135m不等,取得了很好的美学效果。1929~1939年的十年间,德国莱茵河上又建成了四座自锚式悬索桥,其中最著名的是主跨达3m米的Köln-Mülheim桥(如图1.1-4所示)。