

江阴大桥增设主缆 除湿系统关键技术

江苏扬子大桥股份有限公司
江苏省交通规划设计院股份有限公司 著
镇江蓝舶工程科技有限公司



科学出版社

江阴大桥增设主缆除湿系统 关键技术

江苏扬子大桥股份有限公司

江苏省交通规划设计院股份有限公司 著

镇江蓝舶工程科技有限公司

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合江阴长江公路大桥,开展悬索桥增设主缆除湿系统关键技术研究。吸收和借鉴国外发达国家悬索桥主缆检查成功的技术和经验,开展主缆检查相关工作,了解和掌握其主缆钢丝锈蚀程度,同时设立温湿度监测装置,对密封状态下的主缆内湿温度进行了监测分析。实施现场送风实验,量化主缆防护体系的密封效果和干空气流经主缆内部的阻力。提供了既有悬索桥增设主缆除湿系统的关键参数。主缆干空气除湿系统在国内外新桥建设和国外旧桥改造中得到广泛应用,江阴长江公路大桥增设主缆除湿系统,开创了国内先例,为后续国内其他悬索桥主缆改造提供了借鉴和参考。

本书可供从事悬索桥建设、管理、设计、施工、监理的工程技术人员,以及桥梁工程和其他相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

江阴大桥增设主缆除湿系统关键技术/江苏扬子大桥股份有限公司,江苏省交通规划设计院股份有限公司,镇江蓝舶工程科技有限公司著. —北京:科学出版社,2016.8

ISBN 978-7-03-049249-4

I. ①江… II. ①江… ②江… ③镇… III. ①悬索桥—主缆—防潮—研究 IV. ①U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第149207号

责任编辑:胡凯 周丹/责任校对:张怡君

责任印制:张倩/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:10

字数:202 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《江阴大桥增设主缆除湿系统关键技术》

编 委 会

主 编：饶建辉 董学武

副主编：陈雄飞 汪 锋 臧正保 郭庆莲

编 委：饶建辉 陈雄飞 汪 锋 董学武 臧正保

郭庆莲 季 华 沈永富 吕澄刚 李 广

张维苏 孙孝婷 孙洪滨 朱志远 王宁涛

陶 亮 李 军 倪大治 陈 振 胡颖健

阚 嵘

目 录

第一章 概论	1
1.1 江阴长江公路大桥主缆防护历程	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 主缆防腐的传统方法	3
1.2.2 主缆钢丝状态检查	3
1.2.3 主缆除湿系统	6
1.3 既有悬索桥增设主缆除湿系统的研究应用及问题	7
第二章 主缆防护及除湿系统跟踪分析	9
2.1 国内外悬索桥主缆密封系统综述	9
2.1.1 国外悬索桥主缆密封系统	9
2.1.2 国内悬索桥主缆密封系统	12
2.1.3 近年建成桥梁采用的主缆密封体系	14
2.2 悬索桥主缆防护典型案例	15
2.2.1 S型钢丝+柔性重防腐涂料	15
2.2.2 北京航空材料研究院主缆涂装方案	19
2.2.3 橡胶缠包带方案	21
2.3 悬索桥主缆除湿系统典型案例	24
2.3.1 润扬长江大桥主缆除湿系统	24
2.3.2 泰州长江大桥主缆除湿系统	32
2.3.3 江阴长江公路大桥主缆除湿系统	37
第三章 江阴长江公路大桥主缆钢丝状态检查	44
3.1 检查方案	44
3.1.1 主缆检查位置和检查节段长度	44
3.1.2 防雨措施	44
3.1.3 主缆外观和尺寸检查	44
3.1.4 去除外涂装, 检查缠丝情况	45
3.1.5 去除缠丝, 检查腻子情况	45
3.1.6 去除腻子, 检查主缆表面钢丝	45
3.1.7 安装检查窗及温湿度传感器	46

3.2	实施准备	46
3.2.1	员工培训	46
3.2.2	检查窗的设计及制造	47
3.2.3	温湿度传感器的采购及调试	47
3.2.4	工业内窥镜的采购	49
3.3	开缆检查	49
3.3.1	搭设脚手架	49
3.3.2	主缆外观和尺寸检查	50
3.3.3	缠绕钢丝焊接	51
3.3.4	去除外涂装, 检查缠丝情况	51
3.3.5	去除缠丝, 检查腻子情况	52
3.3.6	去除腻子, 检查主缆表面钢丝状况	54
3.3.7	安装检查窗及温湿度传感器	55
3.3.8	检查窗气密性实验	56
3.3.9	内窥镜观察	56
3.3.10	检查完成	57
3.3.11	主缆内温湿度监测	58
第四章	江阴长江公路大桥通风实验	70
4.1	实验段位置选取	70
4.2	主缆检查	71
4.3	开缆	71
4.4	送、排气单元	73
4.5	主缆密封及阻力测试	73
第五章	主缆泄漏率与流动阻力分析	78
5.1	泰州长江大桥阻力分析	78
5.2	润扬长江大桥阻力分析	91
5.3	江阴长江公路大桥阻力分析	96
5.4	泰州长江大桥主缆密封泄漏率	97
5.5	润扬长江大桥主缆密封泄漏率	100
5.6	江阴长江公路大桥主缆密封泄漏率	100
第六章	施工工装	102
6.1	设计使用条件	102
6.2	工期条件	102
6.3	设计要素及技术参数	102
6.4	结构形式	103

6.5 受力分析	107
第七章 增设主缆除湿系统方案及施工	120
7.1 工程范围及主要工作内容	120
7.2 工程施工的重点、难点	121
7.3 增设主缆除湿系统方案	121
7.4 施工方法	132
7.4.1 主缆密封系统	132
7.4.2 主缆除湿系统	136
7.5 安全措施	146
第八章 系统运营	148
8.1 主缆除湿送风系统的运行	148
8.2 系统运行数据	148
主要参考文献	150

第一章 概 论

1.1 江阴长江公路大桥主缆防护历程

江阴长江公路大桥位于靖江市十圩村与江阴市间，通过广靖高速和锡澄高速南连沪宁高速公路和沿江高速公路，北接宁通高速公路。大桥全长 3071m，主跨 1385m，为一跨过江钢悬索桥，是我国第一座跨径超过千米的特大型钢箱梁悬索桥，在当时（1999 年）已建桥梁中位列中国第一、世界第四。桥面按六车道高速公路标准设计，宽 33.8m，设计行车速度为 100km/h；桥下通航净高为 50m，可满足 5 万吨级轮船通航。该桥是国家“九五”规划期间重点建设项目，是国家“两纵两横”公路主骨架中同江至三亚国道主干线及北京至上海国道主干线的跨江“咽喉”工程。该工程于 1994 年 11 月 22 日正式开工建设，1999 年 9 月 28 日胜利建成并正式通车。

江阴长江公路大桥的主缆采用预制平行索股法（PPWS）编制而成。每根索股由 127 根直径 5.35mm、强度 1600MPa 的高强镀锌钢丝所组成，重 50t。索股长度为 2180m，两端采用套筒式热注锚。主跨的主缆由 169 根索股构成，共 21463 根钢丝。边跨比主跨增加 8 根索股。主跨主缆直径达 876mm，边跨主缆直径达 897mm，主缆用高强镀锌钢丝达 16 800t。

江阴长江公路大桥主缆防护基本上借鉴了国外传统的 Roebing 主缆防护体系（图 1.1），即采用的是在挤压成型（接近圆形）的主缆外表面涂抹锌粉防锈腻子、缠绕钢丝和外层油漆。外层油漆采用的是 LEIGH'S 牌油漆，分 6 道进行涂装：第一道为磷酸锌环氧树脂涂料，干膜厚度 50 μm ；第二道为云铁酚醛漆，干膜厚度 65 μm ；第三道同第二道；第四道为中间漆，干膜厚度 35 μm ；第五道为醇酸面漆，干膜厚度 35 μm ，油漆最小干膜总厚度 250 μm 。

作为悬索桥的“生命线”，主缆的防护备受关注。江阴长江公路大桥主缆防护检查及养护措施见表 1.1。

2005 年，江苏扬子大桥股份有限公司委托北京航材百慕新材料技术工程股份有限公司对主缆防护系统进行改造。其工艺如下：

（1）用铲刀等工具铲除主缆原有的附着不牢的旧涂层，对附着较牢的涂层进行粗糙处理。

（2）用 X-7、X-10 专用溶剂对缠丝表面进行仔细清洗，去除原有缠丝表面残

留的密封膏；并对原涂层清洗，匀涂 BC-1 处理剂。

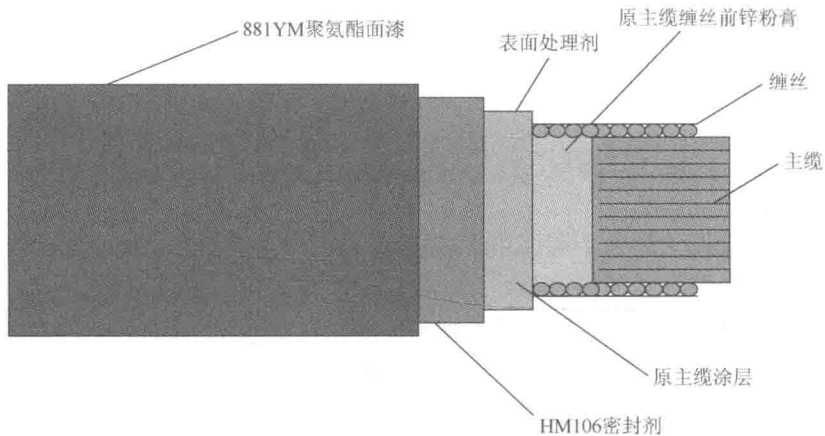


图 1.1 江阴长江公路大桥主缆防护体系

表 1.1 江阴长江公路大桥主缆防护历程

年份	状况	养护维修对策
1999	锌粉腻子+圆型钢丝缠丝+环氧、水性、酚醛、醇酸类涂料涂装	—
2002	主缆涂膜有针孔、粉化、脱落等现象	油漆修复
2003	主缆涂膜有针孔、粉化、脱落等现象	油漆修复
2004	主缆涂膜有针孔、粉化、脱落等现象	油漆修复，东幅北边跨实验段进行密封防护处理
2005	主缆表面涂层存在针孔、气泡、翘皮、脱落、机械损伤等；部分主缆段缠丝间涂层存在裂缝，跨中部位涂层有空鼓、鼓包；索夹环缝腻子开裂、脱落；主缆进水，并加剧油漆的损坏	4月，用 HM106 密封剂在索夹周围进行密封，在原有防护基础上，增加一层 HM106 硫化橡胶及 881YM 聚氨酯面漆
2009	表面局部发现有多处破损，疑为刮破，并有掉漆现象；扶手绳表面油漆脱落，出现部分锈迹；部分扶手杆及横杆油漆脱落；部分悬索灯架锈蚀；南锚室缆套环缝密封胶出现裂缝	—
2010	扶手绳表面油漆脱落；部分扶手杆及横杆油漆脱落；部分索夹直缝发现有裂缝；南锚室缆套环缝密封胶出现裂缝；缆套表面油漆有少许脱落	—
2011	扶手绳表面油漆脱落，出现局部锈蚀；部分扶手杆及横杆油漆脱落；索夹的环缝和直缝未发现裂缝；南锚室缆套环缝密封胶出现裂缝	主缆油漆进行零星修补，主缆扶手绳进行重新油漆

- (3) 刷涂 XF06-2 磷化底漆一道，干膜厚度为 $10\mu\text{m}$ （仅用于露出缠丝部位）。
- (4) 刷涂 881D 环氧云铁底漆二道，干膜厚度为 $80\mu\text{m}$ （仅用于露出缠丝部位）。
- (5) 刮涂 HM106 密封剂三四道，平均厚度为 2.5mm 。
- (6) 刷涂 881YM 聚氨酯面漆三道，干膜厚度为 $180\mu\text{m}$ 。
- (7) 顶部 30cm 宽用 881YM 聚氨酯面漆及石英砂制成防滑层。

但该方案没有解决原有主缆内部积水问题,且主缆钢丝的锈蚀情况仍不明朗。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 主缆防腐的传统方法

较早的主缆防护系统是在主缆的表面进行防腐涂装。涂抹防护腻子,并用缠丝缠绕,外加保护层,结构形式如图 1.2 所示。

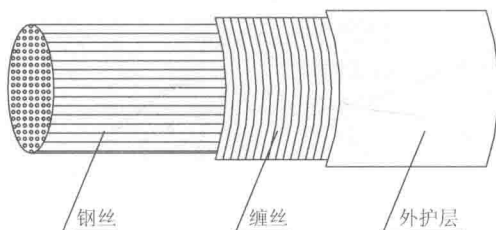


图 1.2 主缆结构

这种传统的主缆防护体系,实际上是通过对外缆外层进行密封包裹来防止水分侵入其内部以达到防腐目的。在 20 世纪建造的绝大多数悬索桥主缆都采用这种防护体系。国外近年来的调查研究结果表明,该防护体系的防护效果并不理想。

由于施工过程中可能受雨水侵袭,以及使用过程中受动载作用的影响,防护腻子的老化和外护层的破损,空气中的水蒸气和雨天中的雨水侵入,主缆中的钢丝会因受潮而产生锈蚀。由于锈蚀减少了主缆索股的有效面积和强度,因此会严重地危害到悬索桥的安全性。

1.2.2 主缆钢丝状态检查

由于国内悬索桥建设时间相对较短,关于主缆钢丝状态检查仅是对主缆防护体系的外观进行检查,看是否有油漆开裂及渗水等现象,维修也主要集中于外涂装的修复。

美国国家科学院运输研究委员会委托纽约 Weidlinger 顾问公司指导编写一份主缆检查指南。这份指南就是著名的美国国家公路研究合作计划 (NCHRP) 报告 534。虽然该指南直到 2005 年才公开出版,但福斯公路大桥 2004 年就决定采纳 NCHRP 报告 534 草案的建议,即对于营运 30 年以上的悬索桥空中编缆主缆,应打开主缆进行第一次内部检查。

英国福斯公路大桥是一座大跨径悬索桥，主跨 1006m，边跨 408m，是当时世界上除美国之外的最大跨径的悬索桥，1964 年建成通车，见图 1.3。其主缆公称直径 600mm，由 11618 根直径 4.98mm 的镀锌钢丝（共 37 根索股）组成，钢丝强度为 1544~1698MPa。

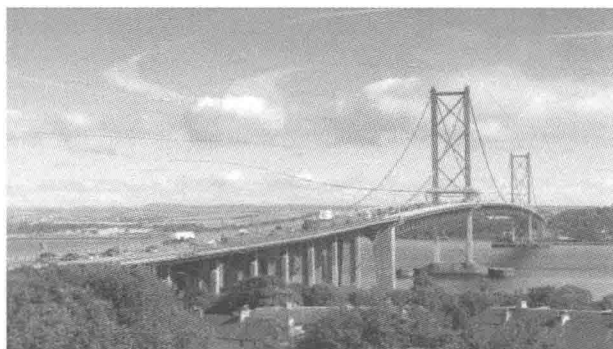


图 1.3 英国福斯公路大桥

该桥于 2004 年、2005 年对主缆内部进行检查。在 2 根主缆的不同位置，总共打开了 10 个长 18m 的节间（1 个节间指 2 根吊索间主缆长度），见图 1.4。对每一节间进行检查，经检查发现，在一些节间，存在范围较广的钢丝锈蚀及断丝现象，见图 1.5。

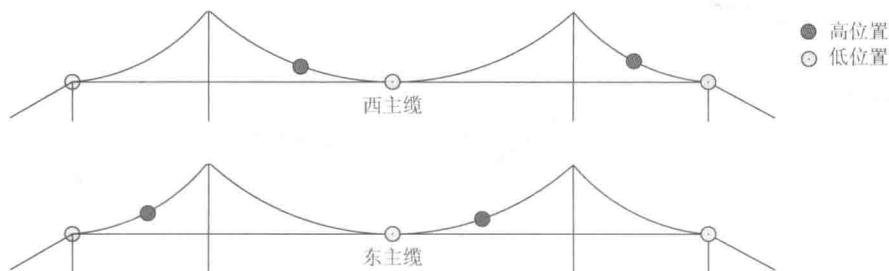
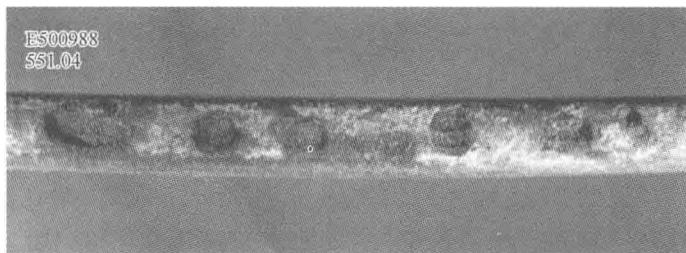
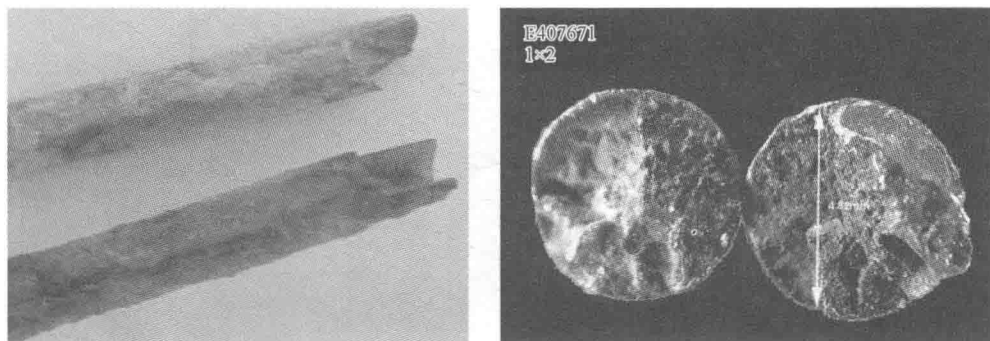


图 1.4 主缆钢丝检查位置



(a) 钢丝锈蚀表面形貌



(b) 钢丝断裂面形貌

图 1.5 钢丝锈蚀及断裂形貌

基于上述检查结果，以打开问题最严重段作为参考，主缆钢丝强度损失为 8%~10%，根据上述实验结果并结合福斯公路大桥实际恒载和活载情况，主缆的安全系数估计变化见图 1.6。如果钢丝腐蚀速率不加以限制，则按悲观估计，到 2014 年主缆安全系数将降低到 2.02；按乐观估计，主缆安全系数到 2019 年将下降到 2.05。如果按主缆安全系数不低于 2 作为主缆安全系数可接受条件，则在 2014 年前后应限制桥梁荷载。

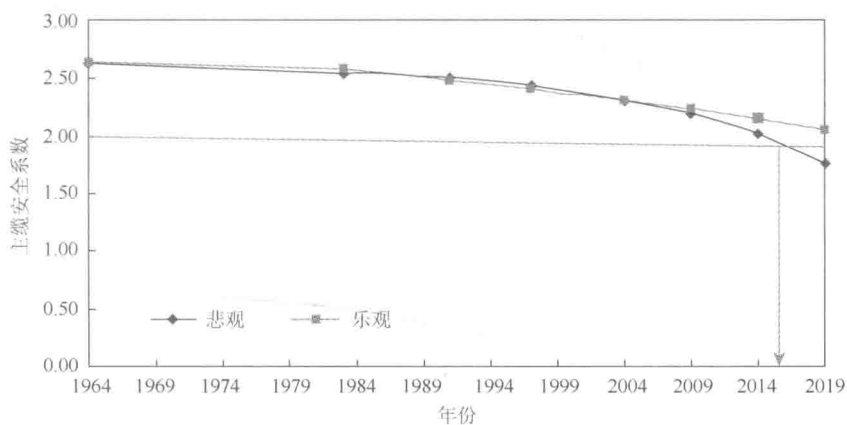


图 1.6 主缆安全系数

由于福斯公路大桥到 2004 年使用时间才刚到 40 年，远未达到桥梁的设计年限，当时上述调查结果引起了政治和媒体风暴，使人们对传统悬索桥主缆防护系统产生质疑。为此，福斯公路大桥安装声发射系统对主缆钢丝断丝情况进行监测（图 1.7），同时采用干空气系统对主缆进行除湿（图 1.8），以降低主缆钢丝的腐蚀速度。

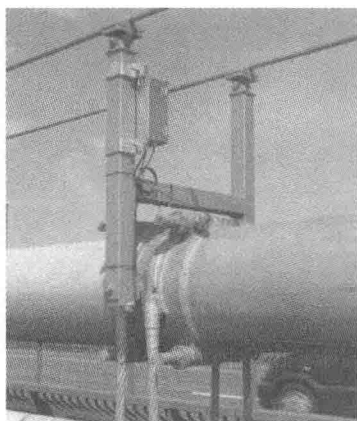


图 1.7 主缆上安装声发射监测系统

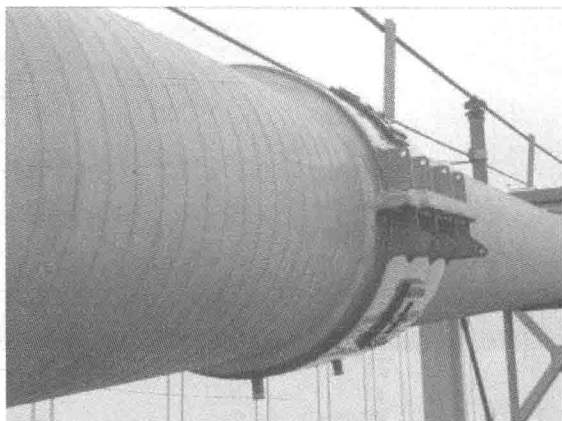


图 1.8 防腐胶带+干空气主缆防腐体系

英国福斯公路大桥还分别在 2008 年和 2012 年进行了第二次和第三次主缆检查。

1.2.3 主缆除湿系统

20 世纪 80~90 年代，美国、日本等国家和欧洲一些国家相继开展主缆防护技术的研究和应用。在日本桥梁建设中，20 世纪 90 年代集中地出现了世界性的有关悬索桥主缆的腐蚀由内部扩展的报告。腐蚀可认为主要是由在索缆的架设施工过程中滞留在主缆内部的水分和建成后从外部侵入的水分所引起，新日本制铁株式会社（简称新日铁）认为在新建桥梁中应克服此类问题，在通过一定的实验研究的基础上开发了“主缆除湿系统”以及 S 型缠丝，并在新建的悬索桥主缆防护技术中开展运用并积累大量工程实践经验。主缆除湿系统的工作原理见图 1.9。

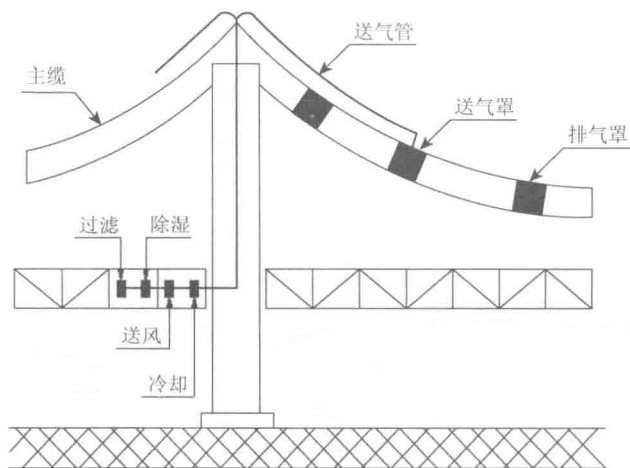


图 1.9 主缆除湿系统的工作原理

欧洲对现代悬索桥技术进步贡献较大。欧洲将除湿技术引入悬索桥,用于钢箱梁内部除湿,索鞍和锚室除湿保护。欧洲悬索桥主缆防护沿用了美国防护体系,20世纪80年代有些欧洲国家就开始用镀腻子代替红丹腻子,各种长效涂料涂装体系和缠带等都得到应用。主缆内部锈蚀、断丝问题在欧洲也存在,有些桥梁不得不增加主缆或重建。日本开发出主缆除湿系统并成功应用后,欧美都比较关注。最近几年,美国、丹麦、法国、瑞典都已经在老桥上应用主缆除湿系统。英国则在三座著名悬索桥(Forth、Seven、Humber)上应用美国平行钢丝缆索检查指南,打开缠丝检查主缆内部,均实施主缆除湿系统抢救主缆。

国内特大型桥梁悬索桥主缆除湿系统在润扬长江公路大桥上首次从日本全套引进主缆除湿系统并加以应用,依托泰州长江大桥工程,江苏省长江公路大桥建设指挥部、江苏省交通规划设计院股份有限公司、解放军理工大学组成联合技术攻关组对悬索桥主缆内部输入干燥空气解决主缆防腐技术展开了研究。

课题组对泰州长江大桥开展悬索桥主缆除湿系统自主研发关键技术研究。通过理论分析、模型实验、实桥验证,对主缆内空气流动沿程阻力、局部阻力,主缆内空气与水热质传递机理,主缆除湿系统设计及主缆微正压防潮技术,系统在维护阶段的低能耗运行方法和主缆内部状况监测与需求控制方法等关键技术进行了研究。在科研成果的基础上,进行了设备选型,研发了冷却器、超压自动排气阀等有自主知识产权的设备,建立了主缆除湿中试系统,在中试平台上对主缆除湿工艺、参数、架构、功能、相关设备等进行了全面的实验与验证,实现了系统的全自动控制。在科研与中试成果的指导下,在国内首次自主建设完成悬索桥主缆除湿系统工程。

1.3 既有悬索桥增设主缆除湿系统的研究应用及问题

我国悬索桥建设和运营时间相对较短,建设时对主缆的工程防护措施、施工工艺与国外相比尚存在一定的差距,对已建大桥的主缆防护的检查也仅限于外观,对主缆的密封泄漏率没有掌握;对主缆也未实施过开缆检查,其真实的腐蚀情况尚不清楚。由于既有悬索桥均运行了一段时间,主缆钢丝有可能发生锈蚀,空气流经主缆内部的阻力与新建桥梁相比可能存在较大的差异,在实际工程中,主缆除湿系统的设计必须掌握主缆密封泄漏率和气体通过主缆时的各种阻力这两个关键参数。

由于悬索桥一直是大跨径和特大跨径桥梁的主要形式,这些已建成的悬索桥连接了我国交通系统的主要干道。新建桥梁的施工条件可以保证系统的顺利实施,而如何在保证大桥的安全运营的情况下,充分利用大桥现有结构,开发

相应工装，研究设备运输及安装工艺，以便顺利实施主缆除湿系统还需作深入研究。

综上所述，主缆干空气除湿系统在国内外新桥建设和国外旧桥改造中得到广泛应用，但国内尚未有既有悬索桥主缆改造中应用于干空气除湿系统的先例。江阴长江公路大桥主缆采用除湿系统，这将开创国内先例，为后续国内其他悬索桥主缆改造提供借鉴和参考。

第二章 主缆防护及除湿系统跟踪分析

2.1 国内外悬索桥主缆密封系统综述

2.1.1 国外悬索桥主缆密封系统

现代悬索桥梁的历史是从 1883 年美国建成布鲁克林大桥（主跨 486m）开始的，随后西方发达国家开始大规模建造大型悬索桥梁。1931 年，美国纽约建成了乔治·华盛顿桥（主跨 1067m），使悬索桥的跨度超过了 1km。到 20 世纪末，随着日本明石海峡大桥（主跨 1991m）的建成，悬索桥的跨径已接近 2km。在 100 余年的历史中，其主缆涂装体系多种多样，并形成了多种涂装专利体系。日本、欧美主要涂装体系见表 2.1~表 2.3。

表 2.1 国外主要悬索桥梁主缆涂装体系（日本）

国家	桥梁	主缆涂装体系	建成年
日本	平户大桥	高分子有机铅腻子+圆型镀锌钢丝缠绕+氯化橡胶罩面	1977
日本	因岛大桥	铅酸钙高分子有机铅腻子+圆型镀锌钢丝缠绕+氯化橡胶罩面	1983
日本	大鸣门桥	铅酸钙高分子有机铅+圆型镀锌钢丝缠绕+环氧树脂（底涂和中涂）+聚氨酯树脂面涂	1985
日本	濑户大桥 （包括下津井、 北备赞、南备赞 濑户大桥）	铅酸钙类糊状密封膏（与高分子有机铅并用）+圆型镀锌钢丝缠绕+环氧树脂底涂+聚氨酯树脂中间涂层+石英砂防滑施工+聚氨酯树脂面涂+双组分聚硫密封剂罩面	1988
		从 1993 年开始研究加装橡胶包覆密封+带盐分过滤器的缆索送风干燥系统	1998
日本	明石海峡大桥	圆型镀锌钢丝缠绕+橡胶底涂（双层）+弹性氯丁橡胶带包覆+氯磺化聚乙烯涂装+主缆内干燥空气送气（不用腻子，首次采用干燥空气送气）	1998
日本	白鸟大桥	磷酸铝密封膏+S 型镀锌钢丝缠绕+柔性环氧树脂·氟树脂罩面；索夹内主缆密封采用双组分改性硅（橡胶）和单组分聚氨酯（首次采用 S 型钢丝缠丝）	1998
日本	来岛大桥	S 型镀锌钢丝缠丝+柔软型环氧·氟树脂涂装+主缆内干燥空气送气驱湿，不用腻子	1999
日本	安芸滩大桥	S 型镀锌钢丝缠绕；吊索为镀锌钢丝集束后用聚乙烯包覆然后用氟树脂包覆	2000

表 2.2 国外主要悬索桥梁主缆涂装体系（英、美）

国家	桥梁	主缆涂装体系	建成年
美国	布鲁克林大桥	铅丹腻子+圆型钢丝缠丝+油性漆	1883
美国	威廉斯堡大桥	铅丹腻子+圆型钢丝缠丝+油性漆	1903
美国	金门大桥	铅丹腻子+圆型钢丝缠丝+油性漆；维修采用氯丁橡胶带缠绕和氯磺化聚乙烯涂装	1937
英国	福斯公路大桥	2004 年实施缠包带+主缆除湿	1964
英国	纽波特桥	塑料带包覆（FRP）+丙烯酸树脂涂层（无腻子，无钢丝缠绕）	1968
英国	威尔士塞文桥	主跨 988m，传统防护，2006 年实施主缆除湿	1966
英国	亨伯桥	主跨 1410m，传统防护，正开展开缆检查	1981

表 2.3 国外主要悬索桥梁主缆涂装体系（其他欧洲国家）

国家	桥梁	主缆涂装体系	建成年
德国	汉堡大桥	铅丹腻子+圆型钢丝缠丝+底涂+含有云母状氧化铁的环氧树脂涂料（MIO）	1979
法国	阿基坦桥	主跨 394m，主缆锈蚀和断丝；2003 年重建主缆，缠绕镀锌钢丝，弹性缠包带，选择除湿	1967
瑞典	高海岸桥	主跨 1210m，原传统防护体系；2004 年开缆检查发现锈蚀，选择除湿	1997
挪威	哈当厄尔大桥	主跨 1345m，设计主缆除湿	2013
意大利	墨西拿大桥	跨墨西拿海峡，主跨 3300m，双缆结构，双缆除湿专利	规划
丹麦	小带桥	主跨 600m，修正的 Roebling 体系，选择除湿	1970
丹麦	大带桥	主跨 1624m，传统防护体系，锌腻子	1998
土耳其	博斯普鲁斯海峡大桥	主跨 1074m，传统防护体系，红丹腻子	1973
土耳其	博斯普鲁斯海峡第二大桥	主跨 1090m，传统防护体系，红丹腻子	1988
比利时	坎尼桥	主跨 94.2m，HDPE 防护	2005

从表 2.1~表 2.3 可以看出以下几点。

1. 欧美国家

欧美国家建造悬索桥梁数量多，历史长，其主缆防护一般采用常规的、成熟的技术，即

- （1）主缆缠丝前：铅丹油膏或聚氨酯锌粉膏。
- （2）缠丝：圆型钢丝。
- （3）主缆缠丝后：醇酸、环氧、丙烯酸酯、聚氨酯油漆。

该体系比较典型的代表作是美国旧金山于 1937 年建成的主跨达 1280m