

旧金山金门大桥建设的技術与管理创新

徐冬梅, 王大明

(中国科学院大学人文学院, 北京 100049)

摘要: 美国旧金山金门大桥建成于 1937 年, 至今已有近八十年的历史。它在建造和运营管理中, 创下了众多第一次, 开拓了工程创新的新局面。然而, 最初, 金门大桥被公认为是“不可能完成的任务”。除了复杂的地形条件、更长的跨度等技术壁垒外, 资金、工期等管理壁垒束缚了它成功的步伐, 那它是如何突破技术壁垒和管理壁垒以获得技术创新与管理创新的? 本文以金门大桥的筹建、施工、运营等方面的历史为背景, 试图解答其创新是基于何种背景产生的, 以及其做法对今天的工程创新有何启发意义。最终发现, 公众参与、科学管理及集成性创新对金门大桥的成功起着至关重要的作用, 而且其克服壁垒走向创新的做法值得借鉴性学习。

关键词: 悬索桥; 金门大桥; 技术创新; 管理创新

中图分类号: N031

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2015)01-0106-10

引言

桥梁是不同地域社会成员之间交往的重要途径, 在经济发展中扮演重要角色, 其中悬索桥这一桥型凭借能完成较长跨度的优势, 在设计建造中被多次采用。悬索桥又称吊桥, 最初是以藤、竹、树茎、麻绳、木材等为材料, 后来其材料逐渐发展为钢铁、水泥与合金等。西方产业革命的兴起推动了悬索桥的大力发展, 特别是 20 世纪 30 年代, 美国开启了修建大跨度悬索桥的热潮。其中, 成为旧金山地标性建筑的金门大桥就是于这段时期建造的, 它于 1933 年动工, 历时 4 年完成。

金门大桥可谓是悬索桥界的杰出代表, 它不仅在大型悬索桥工程中一直扮演着领头羊的角色, 而且也是所有大工程建造和运营管理的一个标杆。最初跨越金门海峡建造桥梁被认为是“不

可能完成的任务”, 除了较长的主跨等技术壁垒的原因外, 庞大的造桥资金等非技术问题亦是阻碍建造的又一难题, 兼之地震带附近及港口等复杂的地理条件, 甚至海湾地区的暴风、海潮、浓雾等轮流肆虐等, 都增加了桥梁修建的难度系数, 其难度在百年后的今天仍是不容小觑。再者, 人们普遍认为, 但凡大桥能建成, 其建造资金亦在 1 亿美元以上。可是, 金门大桥最终仅耗资 3 500 万美元建成, 而且在历经近八十年的暴风、浓雾、地震等考验后, 仍屹立在金门海峡, 堪称成功工程的典范。金门大桥的成功得益于其在技术和管理上的诸多创新。倘若其没有克服技术和管理上的诸多壁垒, 那么这座堪称“世界七大土木工程”之一的金门大桥将无缘面世。下面详述金门大桥在技术和管理等方面的种种壁垒, 以及其为克服这些壁垒所做出的创新举措。

1 社会需求推动金门大桥的建设

旧金山地区三面环海、一面环山。在早期,除了南端邓巴顿海峡(Dumbarton narrows)低水平的铁路桥外,该地区没有其他桥梁,与北部和东部地区的联系主要通过航运。截止到19世纪末20世纪初,轮渡仍是从旧金山通往北部马林省的唯一方式。而且,由于缺乏与周边地区永久而便捷的联系,其经济增长率低于全国平均水平^[1]。

在海湾地区建造桥梁以加强与周边地区联系的想法由来已久,早在1869年8月,约书亚·诺顿(Joshua Norton)首次提出在海湾地区建造大桥的主张,不过他认为应在旧金山东部的奥克兰和耶尔巴布埃纳岛间建立悬索桥,加强旧金山与东部地区的联系。跨越金门海峡建造桥梁的想法始于1872年,中央太平洋铁路公司的建筑商查尔斯·克罗克(Charles Crocker)在建造中央太平洋铁路时预见了旧金山在西部地区的重要性,他根据工程师提供的地图,设计了从旧金山到北部马林省的悬索桥,并向马林县监事会提交了这一方案。但是由于这一方案成本比较高,而且轮渡尚能满足运输车辆的需求,这一方案最终被舍弃。之后,这一设想蛰伏了40多年。

直至1915年,巴拿马运河的开放给旧金山地区带来了主要的海上贸易,推动了海湾地区工业化的进程,人口的激增和社会需求的增加使得轮渡日益不能满足快速运输的需求^{[2][21]}。交通的不便捷促使《圣佛朗西斯科呐喊报》(*San Francisco Bulletin*)的记者詹姆斯·威尔金斯(James H. Wilkins)复苏了跨越金门海峡造桥的想法。他毕业于加利福尼亚大学工程专业,曾参加了1872年马林省的董事会会议,经济的快速发展使其日益认同克罗克的观点。1916年,他在《圣佛朗西斯科呐喊报》上发布了一篇文章,提出其造桥设想:在水上150英尺处建造主跨为3000英尺的悬索桥,并指出“没有桥跨越金门海峡,整个海湾地区就是不完整的”^[3]。但是受第一次世界大战影

响,他的宣传受阻。1918年,他又继续推广这一想法,对轮渡日益不满的公众对此纷纷响应,造桥呼声空前高涨。后来,这一想法引起了监事会成员理查德·韦尔奇(Richard Welch)的关注,经其提议,旧金山市监事会请求国会授权联邦调查普雷西迪奥和马林省之间的要塞——金门海峡,并获得批准。1919年8月下旬,圣佛朗西斯科市工程师迈克尔·奥肖内西(Michael M. O'Shaughnessy)在旧金山监事会要求下研究在金门海峡上造桥的可行性,自此,金门大桥的筹建逐渐步入正轨。

值得一提的是,在桥梁筹划期间,为缓解日益增长的社会需求造成的交通压力,海湾地区的轮渡公司试图通过增加航线以满足社会需求。1919年,海湾地区新增两条轮渡航线——一条是通往旧金山北部马林省的索萨利托(Sausalito),另一条是通往旧金山东部奥克兰的百老汇(Broadway),可是,新增的航线很快就不能满足快速增长的社会需求。截止到1929年,出入旧金山的航线已经超过7条,但是社会需求问题仍然不能被满足。桥梁建造以前,需要运输的车辆最高达到3000辆,而当时轮渡的运输能力大约是1000辆/h,严重影响了交通的便捷性。除此之外,轮渡的垄断,收费情况及服务水平都引发了公众对轮渡的不满。

跨越金门海峡建造桥梁势在必行,但是此次桥梁能否顺利筹建依旧前景渺茫。技术、资金等壁垒迫使造桥计划一再延后,甚至技术问题克服后,突如其来的经济危机再次对方案的执行当头一棒,资金问题成为困扰其成功的又一问题。最终,历经10余年,金门大桥最终得以成功筹建。其成功取决于较好地克服技术、资金及管理壁垒,甚至采取一些创新方式以规避风险。

2 金门大桥建设中的重要技术创新

跨越金门海峡建造大桥最初被认为是“不可能完成的任务”。除了尚未有在海湾入海口造桥的

先例外, 金门海峡独特的地理条件更是极大地增加了造桥的难度系数: 海峡超过 300 英尺 (约 91 m) 深, 而且最窄的地方也有 5 357 英尺 (约 1 632 m) 长, 即使桥梁的主跨设计为 4 000 英尺 (约 1 219 m), 也远远超过了当时桥梁设计的最大跨度; 由于直接与太平洋相对, 具有较强的潮汐和海潮冲击; 几乎恒定的 60 英里/h 的风速; 常年的浓雾等。不仅如此, 它距离 1906 年的旧金山地震的震中不足 6 英里 (约 9.6 km)。种种不利因素对金门大桥的设计与建造提出了不小的挑战, 要想顺利筹建金门大桥首先需要突破技术上的壁垒, 以便在这一水域修建长跨度桥梁。

2.1 设计方案的多次变更——公众参与、新理论促使其变更桥梁方案

受技术水平及造桥资金等因素的制约, 金门大桥最初的造型方案并不尽如人意, 甚至存在一些结构性的问题。虽然公众亟需借助金门大桥带动旧金山地区及北部地区的发展, 但是他们并没有选择迁就, 而是对金门大桥在技术层面上提出更高的要求。自 1921 年最初方案的提出后, 桥梁的设计方案就此做出多次修改。

最初作为蓝图的设计方案是由桥梁工程师约瑟夫·施特劳斯 (Joseph Strauss) 提出的。1919 年, 奥肖内西请求美国海岸和大地测量部门勘探金门海峡底部的岩石情况, 1920 年 5 月调查完成。奥肖内西将调查结果分别寄给三位著名的工程师询问建桥的可能性及方案。这三位工程师分别是约瑟夫·施特劳斯 (Joseph Strauss)、弗朗西斯·麦克马斯 (Francis McMath) 以及古斯塔夫·林登塔尔 (Gustav Lindenthal)。除了麦克马斯没有回复外, 施特劳斯和林登塔尔都肯定了项目的可行性, 不过林登塔尔认为造桥的成本不低于 6 000 万美元, 甚至很有可能到达 7 700 万美元, 这远远高于奥肖内西 2 500 万~3 000 万美元的经费预算。而在施特劳斯的回复信件中, 他只是肯定了项目的可行性, 并没有立即给出设计方

案, 而是仔细问询了旧金山市可以承受的建造费用。根据联邦的调查报告及奥肖内西提供的经费预算, 1921 年 6 月 28 日, 施特劳斯完成并提交了设计方案——混合悬臂吊桥的结构 (图 1), 即利用悬臂原理, 将两端宽大的悬臂结构与中部的悬索结构相连接。在他看来, “纯粹的悬臂结构将导致桥梁的自身重量过大, 而纯粹的大跨度悬索结构将导致桥梁缺少必要的刚性, 并且存在可行性低及费用较高的问题, 两者的有效混合不仅能很好地取长补短, 而且费用不高”^{[4]21}。由于斯特劳斯缺乏设计建造大跨径桥梁的经验, 为确保桥梁方案的稳妥性, 他在提交方案之前, 特意征询了他的同事——来自伊利诺斯州和纽约的三名工程师的意见, 桥梁结构的合理性得到肯定。由于受当时技术水平及造桥资金等的局限, 这种结构方案看似无可厚非, 但是并非完美无缺。在其后的方案推广中, 该结构的不合理性也被公众发现。对此, 施特劳斯做出修正, 不过他仍坚持悬臂-悬索桥结构 (图 2)。



图 1 约瑟夫·施特劳斯 1921 年的设计方案
图片来源: 文献[4]27。



图 2 斯特劳斯修改后的桥梁方案
图片来源: 文献[2]23。

由于修正后的方案破坏了当地环境的和谐等原因, 仍遭到公众的反对。对此, 斯特劳斯在坚

持自己最初方案的同时,要求里昂·莫伊塞弗(Leon Moisseiff)设计低价位的纯悬索桥方案,并牵线位于芝加哥的查尔斯·埃利斯(Charles A.Ellis)和位于纽约的里昂·莫伊塞弗(1909年曼哈顿悬索桥缆索设计者)书信交流,开始大胆探索当时业界尚有难度的4 000英尺以上悬索桥。

19世纪上半叶以前,桥梁工程师主要是通过弹性理论来设计悬索桥,后来人们逐渐意识到受均匀荷载的悬索桥在承受一集中荷载时,行为是非线性的。1862年,有学者提出了无加筋梁的悬索桥挠性理论^[5],1909年首次将此理论运用于曼哈顿悬索桥的设计中。莫伊塞弗正是曼哈顿悬索桥的悬索工程师,他在参与曼哈顿桥梁的设计中掌握这种理论,并进一步完善了这种理论。根据他修改后的理论,约有一半的风压能被缆索承受并传递给桥塔和桥墩,同时桥梁晃动中又能平衡这种压力,这样,悬索桥可以设计得更长、更轻、更窄,省时省钱。他将这一理论分享给埃利斯,并与之探讨,最终在他们的努力探索下,设计了

纯悬索桥结构(图3)。而且,此时冶金工艺的发展保障了大跨径桥梁在技术上可行性。1931年,首次突破千米的乔治·华盛顿悬索桥(George Washington Bridge,主跨1 067 m)的成功建成,进一步强化了工程师们对纯悬索结构的信心。



图3 莫伊塞弗和埃利斯共同设计的纯悬索桥梁
图片来源:文献[6]。

广泛的公众参与新理论的完善及运用为克服技术壁垒提供了很好的思路,使得桥梁工程师们在解决技术难题的时候更加有的放矢,进而得以突破更长跨度的技术局限,在桥梁史中具有里程碑的意义(图4)。

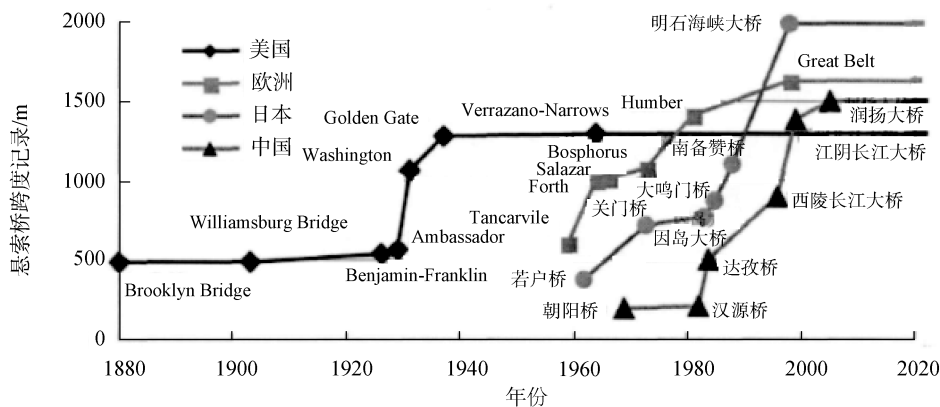


图4 悬索桥主跨的发展演变史

图片来源:文献[7]。

2.2 施工困境迫使其技术创新

悬索桥的施工顺序主要是锚碇、桥墩、桥塔的建造,主缆的纺织与架设及桥面的铺设及浇筑等。由于悬索桥的建造在美国已经有40余年的历史,使其在工艺上有一定的模式可循。但是,金门海峡独特的地形条件使其有别于以往悬索桥的施工过程,特别体现在南部桥墩的建造中。

由于金门大桥位于海湾入口处,潮水的冲击

力比较大,除此之外,桥梁史上尚没有在海湾入海口建造桥梁的经验。苛刻的自然条件及缺乏海湾入海口的施工经验,增大了施工的难度及风险。

“毫无疑问,最困难的工程功绩就是南部桥墩的建造,离海岸约1 000英尺远,水下65英尺深。我知道,全球上没有其他地方能有比金门海峡更加暴力的潮水和天气。11个月,这是人类和海水的 unfair 的对战。”^[8]

根据最终方案,南部桥墩需建在远离海岸

335 m、水下 18~24 m 处的岩石上。然而, 由于位处海湾入海口, 这里易被高潮位的浪涛所袭击。除此之外, 海水里的两股势力的较量更是增加了施工的难度系数: 十余条河流汇流进入旧金山海湾, 并推动海水穿过 1.6 km 宽的缝隙进入内海; 同时, 另一股相反的水势则是北平洋与南太平洋的汹涌洋流, 以每秒钟推动 6.44 万 m^3 水体的速度, 一天两次地通过金门海峡。这显然与桥墩的建造需要平静的水面的情况相违背。

斯特劳斯最初的计划是通过爆破开挖 $1\ 200 \text{ 万 m}^3$ 的岩石, 然后在 $50 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 的范围内通过沉箱法建造围堰以摆脱海浪的袭击, 并在此基础上建造南部桥墩。最初, 他打算建造一个巨大的、整体性的、椭圆形的、混凝土材质的围堰墙体, 然后采用沉箱法建造南部桥墩。但是, 由于该地区的高浪潮, 不久之后他就放弃了这一想法, 决定围堰墙体不再是一个整体式的结构, 而是用一个个独立的箱体堆积而成 (图 5)。

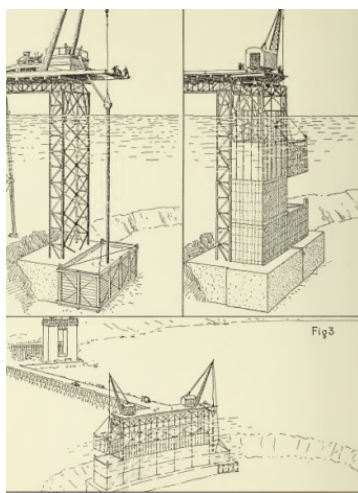


图 5 南部旧金山侧围堰的原计划
图片来源: 文献[9]。

由于南部桥墩的位置距离南部海岸较远, 在建造围堰结构前, 需建造一个 400m 左右长的钢铁栈桥支架, 从海岸伸出延续到南部桥墩的选址处。计划最初进行的很顺利。但是, 1933 年 8 月, 在栈桥结构即将竣工时, 浓雾中驶来的船只撞毁了 91 m (300 英尺) 长的钢铁栈桥支架, 桥墩也

在此次猛烈的撞击中出现问题。1933 年 10 月 31 日, 当晚突如其来的风暴又将剩余 244 m (800 英尺) 长的支架刮散, 最终, 南部栈桥结构在风暴中瓦解。鉴于有限的时间与材料, 工程师团队不得不重新调整施工的技术和方法。

2.2.1 变更栈桥施工工艺

开凿洞穴以树立栈桥结构的通常做法是在岩石上钻出小洞, 然后往里填充炸药, 使其岩石松动。然而由于在开放水域, 普通的开凿方法不能被采用, 而且海底岩层是蛇纹石, 锰材质的挖掘机不能撼动海底岩层进行挖掘工作。为选择合适的工艺来树立栈桥支架, 施工团队绞尽脑汁, 最终选择铁管爆破工艺, 即通过往钢管里填充炸药并使其垂直沉入海底相应位置, 进行爆破。栈桥最初采用钢铁支架结构, 但是这种结构在风暴中被刮散, 此时再去重新铸造、组装钢铁结构将会严重影响工程的进度。工程组决定新栈桥的结构不再采用钢铁结构, 而是用圆滚滚的木桩结构取而代之。选择木桩结构不仅在于其能快速准备就位, 而且它在面对汹涌潮水冲击的时候, 圆滚滚的结构比“ I ”结构受到的冲击更小^[10]。为了方便行走, 栈桥的高度为高于水面 5 英尺 (1.5 m)。该结构于 1934 年 3 月 8 日竣工^[11]。

2.2.2 变更桥墩施工工艺

木栈桥支架完成后, 按照原计划, 应采用沉箱法以建造深度为 65 英尺 (19.8 m) 的围堰结构, 进而建造南部桥墩。但是钢铁栈桥结构被海潮刮散的事故使斯特劳斯等工程师进一步领教了该水域强大的海潮破坏力。为了增加在建桥墩的稳固性, 斯特劳斯决定变更围堰的深度, 将其 65 英尺 (19.8 m) 加深为 100 英尺 (30.5 m)。后来, 决定放弃沉箱法, 选择直接用混凝土浇筑围堰, 即用混凝土围堰挡水, 待围堰内水抽干后浇筑基础混凝土, 再做混凝土墩台。1934 年 3 月 22 日, 高砂土材质的水泥倾注其中, 并嵌入南部桥塔结构, 南部桥墩于 1935 年末完成 (图 6)。最终, 由于施工阶段的种种磨难, 南部桥墩的建造超过了预

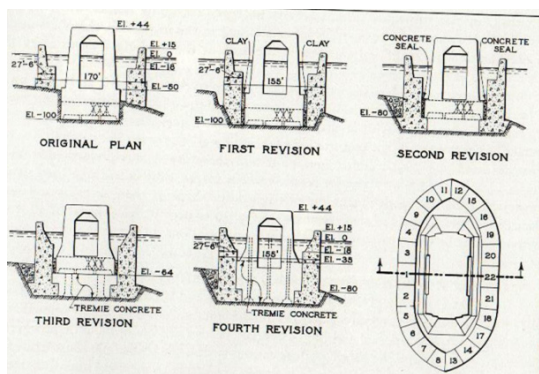


图6 施工期南部桥墩方案的演变图

图片来源:文献[2]143。

计的工程进度,但是迫于工期压力所做的施工工艺创新,使其成功克服了技术壁垒。

3 旧金山大桥建设中的管理创新

除技术壁垒的原因外,资金等非技术原因亦是困扰金门大桥修建的关键问题。为更好地推动桥梁工程的顺利实施,旧金山城市工程师迈克尔·奥肖内西、旧金山市长的秘书爱德华·雷尼(Edward Rainey)以及斯特劳斯共同提出成立一个机构,以促使所有参与的城市在桥梁融资、设计、建造的时候有话语权^[12]。1923年1月15日,该机构——金门建桥协会(the Association of the Bridging the Gate)成立。它的首个任务就是游说加利福尼亚州议会通过“金门大桥和公路法案”(the Golden Gate Bridge and Highway Act),成立一个合法的桥区。1923年5月25日,该议案获得通过,议会同意有关县区组成一个桥区,并可以通过贷款、发行债券、收取过桥费来建设和维护金门大桥和公路。1928年,该机构更名为旧金山金门大桥和高速公路行政区(Golden Gate Bridge and Highway District,简称桥区)。1928年12月4日,旧金山、马林省、索诺马县、德尔诺特县4个省以及那帕县大部分地区、门多西诺部分地区加入其中。

为了更好地推进金门大桥这一工程的顺利实施,桥区特成立董事会负责工程的筹资、建造和管理事宜。董事会由19人构成,其中旧金山9人、马林4人、索诺马省3人、那帕1人、门多西诺

1人、德尔诺特1人,时值今日,这一人员布局仍没有改变。这一机构的成立,引导金门大桥工程成功打破了资金困境。

3.1 筹资方式创新

最初,根据政府对该项目的态度,金门大桥的工程师们认为政府会对金门大桥的筹建提供资金支持,然而事情并非如此。1932年7月,海湾地区另一座桥梁——奥克兰海湾大桥提交了相似的造桥申请,这虽不是海湾大桥第一次提交申请,但是政府对其态度发生改变。时值经济危机爆发,政府更加注重项目所带来的经济效益。同海湾大桥相比,金门大桥连接的是经济欠发达地区,人口数量少,而且当时人们对金门大桥南部地下岩层能否造桥墩存有争议。鉴于项目稳妥性及效益等诸多因素的考虑,1932年12月,联邦政府将有限的资金购买了奥克兰海湾大桥61 400 000美元的债券。同月,又追加了10 000 000美元的债券。失去政府的资金支持以及经济大萧条迫使银行家们不乐意购买债券,造桥方案的实施岌岌可危。

此前存在因缺乏资金而导致项目落马的先例。为成功解决资金困境,发起者提议桥梁的建设资金一小部分由桥区的每位纳税人募集取得,其余部分(3 500万美元)通过发行债券募集,债券发行由桥区负责。倡议者认为大桥建成通车后,不足40年的时间,过桥费不仅能偿还本金,而且还能支付利息。对于这项提议,包括11名著名工程师在内的市民委员会(Citizens' Committee)要求废弃这一计划。甚至,之前与斯特劳斯并肩作战的城市工程师奥肖内西也加入反对造桥者的阵营,他指出,“你的方案很好,但是你永远不可能使公众相信大桥能成功建造。公众不会为这一工程买单,即使他们愿意,也没有银行购买其债券”。他们通过报纸、广播甚至挨家挨户的宣传反对造桥。基于此,桥区特成立信息办事处(Bureau of information)与之抗衡,力求使信息真实准确地传达给公众。最终于1930年11月4日,该提议以145 697

票对 47 005 票得到了三分之二以上公众的支持。然而时值经济大萧条, 向谁借钱又成为一大难题。

斯特劳斯于是拜访了在加利福尼亚州以远见和冒险精神闻名的美国银行的艾曼迪奥·彼得·吉安尼尼 (Amadeo Peter Giannini)。吉安尼尼听后说: “旧金山需要这座桥, 我们乐意购买债券。”^[13]然而, 资金困境并没有终止, 时值银行危机, 在第一次购买 600 万美元的债券后, 美国银行不得不停止购买债券。那段时间, 斯特劳斯继续将自己的钱用于桥梁的计划和调查上, 等待投资期间垫资 25 万美元。银行危机后, 美国银行继续购买其债券, 资金困境才算完全解决。

3.2 工程工期管理

通过发行证券以募集资金的方式成功解决了

金门大桥的燃眉之急, 但是由于造桥资金在性质上属于贷款获得, 每天将近有 5 000 美元的利息支出。面对庞大的利息支出, 工程师们不得不思考如何减少造桥期间的利息费用, 使桥梁尽快投入使用以产生效益。工程师们认为这不仅仅取决于每一子项目完成的速度, 而且也取决于相同、相近工序的完成情况, 能否为下一工序的顺利进行提供可能。为此工程师们制定了严格的时间规划表 (图 7), 并采用平行工序法, 力争相同、相近工序同时完成, 以减少工序间不必要的等待时间。虽然在施工过程中, 由于技术问题的存在, 延误了部分工序的完工进度, 但是工程师们并不为此自乱阵脚, 而是继续坚持平时工序法, 力使余下的工序得以有条不紊地完成。

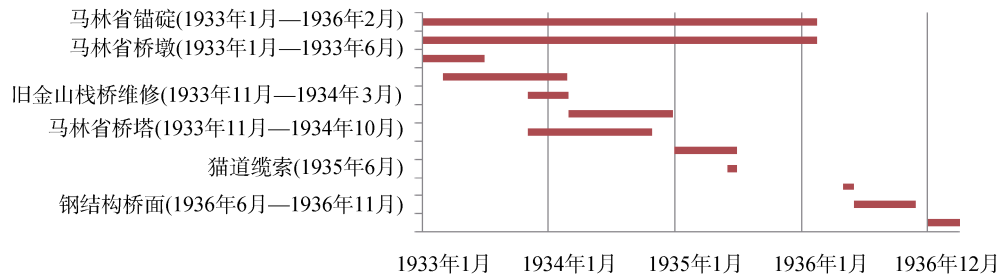


图 7 金门大桥工程实际施工进度图

图片来源: 文献[14]。

3.3 工程安全管理

建造期间, 斯特劳斯坚持用桥梁史上最严格的安全预防措施 (表 1): 斥巨资安装安全网, 强制施工工人戴安全帽作业, 精心制作饮食等。有资料表明, 这一工程虽然不是第一个戴安全帽的工程, 却是第一个强制戴安全帽的工程。这一措

施后来被联邦政府采用, 作为工程施工的标准。施工环境恶劣, 大风暴、雷雨、雾霾、湍急的水流等时常干扰施工。尽管如此, 耗资 3 500 万美元的工程在 4 年多的施工期间只有 11 名工人不幸死亡, 打破了每耗资 100 万美元死 1 名工人的业内常规。

表 1 金门大桥的安全措施

措施	作用
强制戴安全帽	保护施工者, 后被列为美国的施工规范
为铆钉工人提供呼吸面罩	避免吸入敲击铆钉时产生的含铅废气
护目镜	提高可见性, 避免太阳光照射水面产生的“雪盲”现象
特殊的护手霜和面霜	抵挡寒风
精心制定的饮食	防止桥塔和桥面施工中工人的眩晕
提供蔬菜汁	防眩晕
医生在桥墩附近坐镇	预防突发情况的发生
斥资 130 000 美元安装安全网	预防工人坠落

3.4 养护管理模式

海湾入海口以及地震带附近的地理位置,造就了这座大桥运营期间不免受到暴风、浓雾、潮流、地震的轮流肆虐。期间经历了1951年111 km/h的大风和1989年6.9级地震等突发事件,尤其是1989年地震导致美国众多桥梁因出现事故而关闭,但是金门大桥的整体结构无碍。而且,随着运营时间的增长,面临的风险因素愈多。然而,时至今日,近80岁的金门大桥仍在良好的运营中,它是如何保持高效持久的呢?通过文献的阅读发现,除注重日常养护及大事件后的养护管理外,金门大桥采用增设其他交通方式以缓解金门大桥的压力。

3.4.1 增设其他交通方式以缓解桥梁压力

自金门大桥通车以来,实际通车量一直高于预期水平。根据首席工程师斯特劳斯1930年提交的报告,预计1937年通行的车流量为246.5万辆,1970年为1000万辆。然而,实际上第一年的车流量为331万辆,这已达到斯特劳斯最终提交的报告中1941年的预计通车量,1951年其通车量已高达1000万辆^[15]。不仅如此,随着经济的发展,金门大桥的通车量日益增多,截止到1970年,实际通车量已达到3300万辆,远远高于同年1050万辆的预期水平。有限的桥梁容纳能力迫使桥区工作人员努力寻找方法,以适应日益增多的过往车辆。

20世纪60年代,交通拥挤现象日益严重。为避免再建造桥梁的巨大开支,旧金山政府悬赏1000万美元向社会征集办法。最终于1962年第一个启用“潮汐车道”方案,即打破原有3+3车道的固有模式,选择其中一车道为可变的,即4+2模式。虽然这一方案能很好地解决高峰期堵塞的现象,但是仍治标不治本,桥梁的交通压力依旧存在。

为解决日益增多的过往车辆带来的压力,1969年,桥区增设了轮渡和公交两种交通方式。相对于建造新桥的庞大支出,公众们更喜欢这种低成本的改善方式,而且这两种方式的加入,一定程度上缓解了金门大桥的负担。2013年,约有3800万辆车辆经过金门大桥,900万顾客选择公交或轮渡运输服务。

3.4.2 日常养护与事件后养护并重

自桥梁建成通车以来,工作人员就时常对金门大桥进行防腐等养护工作,对于常年备受浓雾、含盐气体等腐蚀的金门大桥而言,及时清理、更新被腐蚀的零部件至关重要,是生死攸关的大事。刷漆工作自1934年钢塔结构铸造以来就没有终止过,如今,已形成38人的刷漆小组^[16]。

除此之外,其他部件的养护工作也没有忽视,自建成以来,金门大桥经历了9余次比较大型的养护事件(表2)。桥区负责人认为,不定时的养护事件并不意味着原有设计的不足,而是为了增

表2 1937—2013年金门大桥比较大型的养护工作

时间	大事件
1953—1954年	一场大风暴后,金门大桥添加了增加桁架稳定性的侧向支撑系统
1967—1969年	首次对悬索桥结构进行全面检查
1973—1976年	首次更换垂直的缆索
1980—1982年	1971年圣费尔南多地震后,加州交通部发布了现有结构新的设计改造标准。旧金山和马林桥两岸进行增加抗震项目。该项目80%的资金(约280万美元)由联邦政府承担
1980—1989年	对11个收费站进行翻新
1982—1986年	首次将混凝土甲板更换为更轻、更强大、正交的钢甲板,桥的重量减少了12300 t。该项目80%的资金(约6810万美元)来自联邦政府
1986—1987年	安装照明设备
1993—1994年	用复制品更换桥梁西侧被恶劣天气腐蚀的人行道栏杆
1997—2013年	对金门大桥进行震后加固

数据来源:文献[17]。

加桥梁的安全性,减少事故发生后再养护的潜在养护成本。而最初的设计图纸完整保存,又为桥梁的养护工作提供了便利。

4 启示

在悬索桥发展的历史长河中,金门大桥扮演着领头羊的角色,首次突破了4千英尺的技术界限,并开创了众多的第一次,是后来者的标杆。纵观金门大桥工程,可以将其划分为如下阶段:1919—1933年,大桥工程的筹备阶段;1933—1937年,大桥工程的施工建造阶段;1937年至今,大桥工程的运营阶段。从“不可能完成的任务”,到“现代世界工程的七大奇迹之一”,再到70余年的安全运营史、造型不过时等,金门大桥的成功得益于工程“全过程”阶段的创新尝试,尤其是在技术及管理上的创新之举,这也给中国悬索桥在工程创新方面提供思路。

1) 首先,公众参与工程的必要性。公众参与可能会在一定程度上延迟工程的动工时间,甚至产生一系列不必要的麻烦。但是,对于能给城市经济带来发展甚至需要公众筹资并以财产作为抵押的大型工程而言,公众对其关注度越高,参与选址、结构、资金来源等问题的讨论越激烈,都会预见性地解决问题。金门大桥的实践证明,对于需要公众人力及资金支持的工程而言,事先在公众中推广建造工程的想法及方案、根据公众要求及时有效地变更方案尤为重要。金门大桥从1922年大桥最初方案的推广,到1933年大桥工程的动工,历时10余年,期间根据公众的意见对工程方案多次修改。为更好地获取公众的意见,并将造桥方的信息真实有效地传达给公众,金门大桥的管理机构成立信息办事处,对于公众的质疑,反复核实,并最终对桥墩选址、桥梁高度、桥梁结构等方面进行修改。值得指出的是,1929年,金门大桥的结构应公众的要求采用更为美观的纯悬索结构,放弃了最初的设计——悬臂-悬索混合结构。新结构的采用,使得金门大桥被公认为

是世界上最漂亮的桥梁工程之一,为当地创造了巨大的旅游收益,至今造型方面仍旧不过时。

2) 科学的管理为降低工程风险提供了有力的保障,其中包括施工、运营的多项环节。譬如施工期间,由于金门大桥属贷款造桥,每天都需承担比较庞大的利息开支,为尽快完工以创造收益,金门大桥制定了严格的工期计划表,创造性地采用了平行工序法,使得相同、相近工序同时完工,使工程间的施工衔接更加自然。但是,在赶进度、省经费的同时,工程组并没有忽视对工程安全的管理,公众的广泛关注等因素使其主动选择和采用降低风险的方法。金门大桥工程开创的桥梁史中最为严格的的安全管理制度,被美国政府选为施工规范。运营阶段,防患于未然的养护管理亦保障了金门大桥的经久不衰。金门大桥不仅注重对日常的养护工作,更加注重暴风、地震等突发事件对金门大桥的影响。突发事件发生后,虽然有时候事件本身没有对桥梁整体性结构造成损坏,但是大桥管理者并不会放任不管,而是派工程师认真检查,以确认之后在面对同样或者更大的事件时,会不会对其安全运营造成影响。

3) 工程具有当时当地性,但是仍有经验可循。当时当地性决定了每个工程都是独一无二的,但这并不意味着成功工程的经验无迹可寻。金门大桥的成功恰恰在于注重方案的稳妥性和集成性创新。在早期,力争在技术水平及项目资金允许的情况下尽可能好地去完成项目。而且,注重集成性创新。譬如在新理论的成功运用后,勇于对新理论借鉴性学习,并从已成功的悬索桥中寻求经验,从而博览众长。此外,在主跨问题的选择上,金门大桥的工程师们并没有太过追求悬索桥的更长跨度,而是具体问题具体分析,以求方案选择的稳妥性。

总之,金门大桥在设计、建造与运营管理等方面创造和积累的经验,使其成为工程史上一项重要的典范。它具有标本意义,为全世界的工程管理提供了丰富的经验借鉴,而且其克服壁垒走向创新的做法亦值得借鉴性学习。

参考文献

- [1] Dresden M. Must a Bridge be Beautiful [M]. California: Access, 2006: 12.
- [2] Golden Gate Bridge and Highway District. The Golden Gate Bridge: Report of the chief Engineer to the Board of the Golden Gate Bridge and Highway District [M]. California: Golden Gate Bridge and Highway District, 1987.
- [3] Dyble L. Paying the Toll: Local Power, Regional Politics, and the Golden Gate Bridge [M]. UPenn: University of Pennsylvania Press, 2013: 90.
- [4] Cassady S. Spanning the Gate: The Golden Gate Bridge [M]. California: Squarebooks, 1979.
- [5] 张国信. 悬索桥设计计算理论比较[J]. 甘肃科技, 2006 (22) : 180.
- [6] Ludks R. Structural Engineers and Architects of the Golden Gate Bridge: The Real Story: Part1 [J]. Structure magazine, 2012(6): 14-17.
- [7] 张杰. 大跨度桥梁施工工期风险分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 2.
- [8] Dillon R, Moulin T, DeNevi D. High Steel: Building the Bridges Across San Francisco Bay [M]. California: Celestial Arts, 1998: 81.
- [9] Mensch C E. The Golden Gate Bridge : A Technical Description in Ordinary Language [M]. Internet archive, 2012: 16.
- [10] Starr K. Golden Gate: the Life and Times of America's Greatest Bridge [M]. New York: Bloomsbury Publishing, 2010: 133.
- [11] Van Der Zee J. The True Story of the Design and Construction of the Golden Gate Bridge[M]. New York: Simon Schuster, 1986: 199-200.
- [12] Special District Formed: Golden Gate Bridge and Highway District [EB/OL]. (2014) [2015-01-20]. <http://goldengatebridge.org/research/ConstructionBldgGGB.php>.
- [13] Chesrer M. Joseph Strauss: Builder of the Golden Gate Bridge [M]. Canada: Longmans Canada Limited, 1965: 76.
- [14] Kei Fung Sameul K. The Study on San Francisco Golden Gate Bridge [C]// Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007. San Francisco, 2007(5): 3.
- [15] Loomis R T. The History of the Building of the Golden Gate Bridge [D]. California: Stanford university, 1959: 198.
- [16] Macdonald D, Nadel I. The Golden Gate Bridge: History and Design of an Icon [M]. San Francisco: Chronicle Books, 2008: 40.
- [17] Golden Gatebridge, Highway and Transportation District. Highlights, Facts and Figures [M]. California: Shepard Associates, 1999: 23.

Technology and Management Innovation of the Construction of the Golden Gate Bridge in San Francisco

Xu Dongmei, Wang Daming

(College of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Golden Gate Bridge in San Francisco was built in 1937 and is nearly eighty years old. It made many breakthroughs in its building and operation management, which opened up a new chapter of engineering innovation. However, initially, it was thought to be a “mission impossible”. In addition to the technical barriers including complex terrain conditions and longer span, some management barriers such as money and time limit for a project blocked its success. How did it break through the technical barriers and management barriers and realized technology and management innovation? This paper explores the background of the bridge’s planning, construction and operation, tries to solve the question of how the innovations were made, and finds out its inspirational significance for today’s engineering innovation. Eventually the paper finds that public participation, scientific management and integration innovation played an important role in its success, and how it overcame barriers to reach innovation is worth learning.

Keywords: suspension bridge; Golden Gate Bridge; technological innovation; management innovation