

(为 2006 年重庆桥梁会议)

中外新建桥梁中的技术创新比较

同济大学 项海帆

一、引言

创新是一个国家或民族进步的灵魂，当前，“自主创新”已成为媒体宣传的热点。然而，创新是一个长期努力的过程，而不是靠宣传动员就可以实现的。特别是对于中国这样一个崇尚统一、和谐、中庸，而不太鼓励标新立异的民族，由于缺少创新理念，往往满足于模仿、重复，就更需要从培养儿童的好奇心和想象力做起，从营造创新体制、激励机制和环境氛围方面下功夫，大力培育具有创新理念和动力的技术人才。

近代土木工程从十七世纪虎克定律创立算起，已经经历了二百多年。特别是英国工业革命以后的十九世纪相继发明了蒸汽机车和铁路、转炉炼钢和混凝土，以及内燃机和电机，为近代桥梁工程的发展创造了条件。桥梁的跨度从十九世纪初的不足 200 米到 20 世纪末已逼近 2000 米。特别是第二次世界大战后计算机的问世标志着桥梁工程进入了发展更为迅猛的现代时期。

在 20 世纪 60 年代，世界各国进入了战后大兴土木的高潮期。高速公路网建设和城市化进程大大推动了现代桥梁工程的发展，预应力的广泛应用和斜拉桥的复兴成为战后桥梁工程二项最主要的成就。计算机的不断进步和有限元法的创立使数值方法逐渐代替了解析和半解析法，并促使桥梁结构分析向精细化方向前进。两种传统材料钢和混凝土的进步、复合材料的应用以及使用多种材料的组合结构的发展，更为创新结构的不断涌现开拓了广阔的前景。各种新工法：如挂篮现浇、移动托架和移动造桥机的预制节段拼装工法以及顶推施工技术等都是 20 世纪 60 年代由发达国家创造的。

中国在 20 世纪 80 年代初的改革开放也迎来了桥梁建设的黄金时代。在学习发达国家创新技术的基础上，通过自主建设造就了中国桥梁的崛起和九十年代的腾飞，取得了令世界瞩目的进步和成就，并得到了国际同行的赞许和尊重。然而，我们应当清醒地认识到，尽管中国桥梁的规模和速度令世人惊叹，但我们所采用的大都是发达国家在六十年代所创造的新材料、新工艺和新结构，我们只是做了人家在 30 年前早已做过的事情。可以说，中国桥梁已走上了复兴的道路，正在从桥梁大国向桥梁强国迈进，如果我们能抓住机遇、努力进取，在创新、质量和美学方面下功夫，积极参与国际竞争，就有希望缩小差距，实现局部的超越。

二、 国外新建桥梁中的技术创新

在 20 世纪最后十年中，国外建造了几座破纪录的大桥，并在多次国际桥梁会议中充分展示了这些桥梁的技术创新。

- 1995 年，法国诺曼第斜拉桥的混合桥面，超长悬臂施工控制、新型平行钢绞线拉索及其防雨振的螺旋线表面处理和阻尼器等。
- 1998 年，丹麦大海带桥西桥 110 米箱梁的整体化施工，预制件的最大重量达 6500 吨，以及为保证耐久性在混凝土箱梁的配筋中预埋 450 个锈蚀传感器；东桥 1624 米悬索桥桥塔和锚碇的新颖艺术处理、桥面箱梁内部的除湿系统以及防船撞系统的研究等。
- 1998 年，主跨 1991 米的日本明石海峡大桥首次采用 180MP 级超高强钢丝，使主缆直径缩小并简化了连接构造，首创的悬索桥主缆除湿系统、水深达 50 米的预制混凝土沉井基础以及在钢桥塔中设置了多层减震阻尼器以抵抗桥位处的强烈地震作用等。
- 1999 年，主跨 890 米的日本多多罗斜拉桥采用平行钢丝、热挤防腐索套外的凹点表面处理以防止雨振、超长悬臂拼装的施工控制技术等。
- 2000 年，丹麦和瑞典联合建设的长达 16 公里的欧勒松海峡桥采用高度整体的预制吊装，140 米跨度公铁两用钢桁架梁，重 8700t 一次吊运安装就位以及严格的质量管理体系等。

以上五座桥梁被公认为是代表 20 世纪最高水平的杰作。进入 21 世纪后国外又建造了几座具有创意的大桥，现分述如下：

1. 希腊 Rion-Antirion 桥(2003)

该桥连接希腊大陆和伯罗奔尼撒半岛之间的科林斯海湾。桥位处岩床深度超过 500 米，2000 年重现期的地震最大峰加速度达 1.2g，且半岛以每年 8-11mm 速度漂离大陆，因此抗震安全是设计最主要的控制因素。



图 1 总图

为了避免强大的地震力作用，该桥选用五跨连续的全漂浮体系斜拉桥，并且将高 65m、墩底基座直径为 90m 的圆形桥墩放在由 $\phi 2m$ 直径深 25-30m 钢管

桩加固，上面铺以砂、卵石和碎石组成的 3m 厚垫层，形成可相对滑动的“加筋土隔震基础”(Reinforced Soil Foundation)上，这是一种创新的基础形式(图 2)。

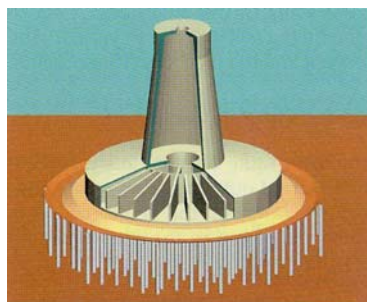


图 2 隔震基础

上部结构为结合梁桥面，墩梁之间设置五个固定阻尼器，当发生大地震时容许中间阻尼器破坏并消能，其余四个阻尼器将起到缓冲的作用以保护桥塔的安全。

2. 法国 Millau 高架桥(2004)

该桥是法国南部通往西班牙马德里的 A75 公路改线中跨越塔恩河谷的大桥(图 3)。河谷深 300 余米，线路要求 2.5km 长的新桥将是一座在 3%坡道上的曲线桥。山谷中的最大阵风风速达 $250\text{km/h} \leq 70\text{m/s}$ 。

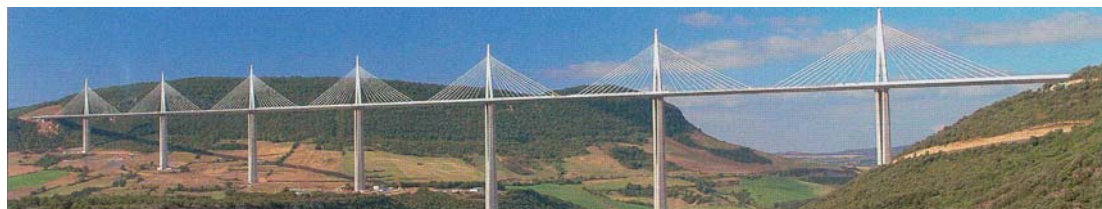


图 3 总体图

该桥采用多跨连续单索面斜拉桥，每跨 342m，共设七个桥墩，其中 2#桥墩高达 245m，加上桥面以上高 90m 的桥塔，总高达 343m。为减少风荷载，桥面采用流线形带风嘴的断面，并设置 3 米高的风障以改善桥面行车环境(图 4)。

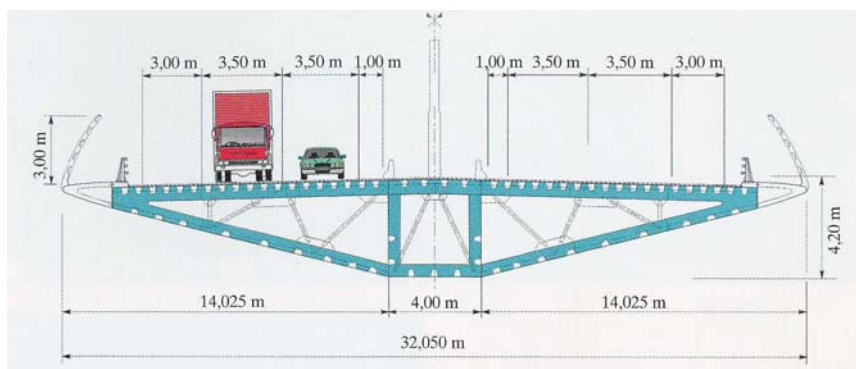


图 4 桥横断面图

单索面的桥塔采用纵向 A 字形，相应地，高桥墩在 165m 以上也设 Y 形分叉，形成薄壁墩和塔柱相对接，这样既保证了塔顶的刚度，又减少了温度影响，同时也富有美感。塔的断面也经过美学处理。

桥梁施工采用 GPS 定位，用顶推法施工(图 5)。桥面箱梁在岸边拼好后，将放倒的钢桥柱沿桥面移动，竖起后安装拉索形成斜拉桥体系再向前顶推。在两个桥墩之间设中间临时墩以减小悬臂长度。每节长 171 米，用 3-5 天时间就位。全桥逐节顶推完成后调整斜拉索。这是一套全新的工法，需要精确的施工控制技术才能保证全长 2.5km 弯坡桥的正确成形。这也是第一座用顶推法施工的跨谷斜拉桥，由著名的法国埃菲尔集团公司承建。



图 5 顶推施工图

3. 美国旧金山新海湾大桥(2007)

原有的旧金山海湾大桥东桥在 1989 年的黑山地震中损坏，市政府决定建造一座满足抗震要求的新桥。

最初的方案是一座独塔斜拉桥和连续梁的协作体系，主跨 275 米，边跨 215 米。采用独塔的造型，一方面是抗震的需要，由相近的两根 RC 塔柱和钢剪力键形组成独塔结构，比传统的门式塔具有更好的抗震性能。剪力键是强震时的牺牲构件，通过它的剪切屈服而吸收能量，并在震后可以方便地更换以恢复其承载性能。这是一种完全创新的“强柱弱梁”式抗震塔柱设计，在经济上也优于全钢或全钢筋混凝土的桥塔(图 6)。东桥的桥面宽度达到 70 米，是迄今大跨度斜拉桥中最大桥宽。由于存在较大的剪力滞效应，在由钢筋混凝土桥面板和钢桁架组成的结合梁桥面中布置了后张预应力，以调整横向的压应力差。

最后的实施方案改为“自锚式悬索桥”体系，这是为了和周围已有的几座悬索桥相协调，同时将跨度调整为主跨 385m 和边跨 180m。新的桥型保留了原有的采用钢剪力键的抗震独塔设计，而两条空间大缆所形成的自锚式悬索桥更具有独特的造型和美感(图 7)。为了在主梁上连接具有强大拉力的大缆，在梁端设计了特别的锚固构造以代替传统的地锚式悬索桥的锚固，与原方案斜拉桥的

拉索锚固相比，这又是一项具有挑战性的创新设计。

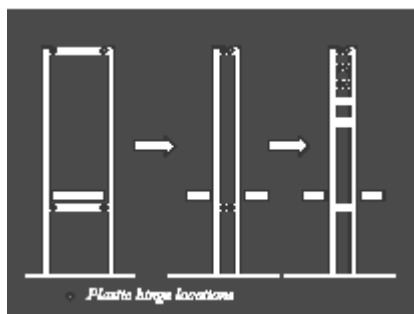


图 6 抗震塔



图 7 自锚式悬索桥

三、国内新建桥梁中的主要技术创新

中国在 1991 年自主建成上海南浦大桥的鼓舞下迎来了 20 世纪最后十年中大规模建设大桥的高潮。在整个九十年代，中国建成了数以百计的大桥，其中比较著名的有以下十五座：

- 跨度 216 米的拱桁组合体系—九江长江大桥，1992
- 破纪录的上海杨浦大桥，1993
- 第一座采用混凝土桥面的悬索桥—汕头海湾大桥，1995
- 首次采用轻型前置式挂篮施工的铜陵长江大桥，主跨 432 米，1995
- 第一座钢箱梁悬索桥，主跨 900 米的西陵长江大桥，1996
- 第一座采用千吨级拉索的真正单索面斜拉桥—钱塘江三桥，1996
- 跨度突破 300 米的钢管混凝土拱桥—邕宁邕江大桥，1996
- 采用钢管混凝土拱作为劲性骨架施工、破纪录的钢筋混凝土拱桥—主跨 420 米的万县长江大桥，1997
- 主跨 270 米的 PC 连续刚架桥—虎门大桥辅航道桥，1997
- 第一座超千米的悬索桥—江阴长江大桥，1999
- 第一座三跨连续悬索桥—厦门海沧大桥，1999
- 采用平行钢绞线拉索及混合桥面的斜拉桥—汕头礮石大桥，1999
- 公铁二用的矮塔斜拉桥，主跨 312 米的芜湖长江大桥，2000
- 主跨 618 米的武汉白沙洲长江大桥，2000
- 主跨 360 米的钢管混凝土拱桥—广州丫髻沙大桥，2000

其中有半数为跨越长江的大桥。与此同时，在 1997 年回归的香港也建成了通往新机场的三座大桥，即青马大桥(1997)、汲水门桥(1997)和汀九桥(1998)。通过这些大桥的建设，中国桥梁界基本掌握了国外的先进桥梁技术，并在运用中结合国情，有所改进和局部的创新，取得了长足进步，缩小了和发达国家的差

距，为 21 世纪更大规模的桥梁建设计划奠定了基础。进入 21 世纪后，沿长江的江苏省、湖北省和重庆市为发展经济建成了许多跨江大桥，其中包括一些破纪录跨度的大桥。下面将分述几座具有代表性的桥梁：

1. 南京长江二桥(2001)

南京长江二桥是目前中国最大跨度的斜拉桥。最大跨度带来的最大塔高、最长拉索以及最大桥面宽度被认为是巨大的挑战。然而，尺度的突破如果没有达到现有技术的适用限度，就不一定要通过技术创新来克服障碍，通过认真的施工实践也能获得优质的成果。

南京二桥的塔墩采用“复合式基础”，即把双壁钢围堰，承台和钻孔桩群组成整体来抵抗船撞力，实际上采用过分大的跨度已经大大减少了船撞的机率。由于桥下通航净高较小，和首创平行上塔柱的日本多多罗桥相比，使塔的桥下高度和桥面以上的塔高之间的比例过小，造成“矮腿”的效果，影响了塔型的美观。

长拉索在全桥合拢后就出现了强烈的风雨激振，临时决定在拉索上加绕螺旋线后抑制了振动，这一经验为此后直接生产带螺旋条的成品索提供了重要的依据。



图 8 螺旋线拉索

南京二桥的长悬臂施工控制，采用较先进的“神经网络控制技术”进行索力和标高的双控，取得了较高的合拢精度。钢箱梁的正交异性桥面板工地接头采用钢面板焊接和 U 形纵肋栓接的形式，是一次新的尝试，具有推广价值。最后，钢桥面的铺装是长期没有解决的难题。南京二桥引进了美国的环氧沥青混凝土的铺装技术，通过力学分析和试验研究，实现了国产化配方的改进和设备研发，工程质量优良，填补了国内空白。经过多年的寒暑季节考验，在限制超载车辆条件下桥面运行情况良好，已在此后的多座大桥中推广应用。

2. 上海卢浦大桥(2003)

主跨达 550 米的上海卢浦大桥是一座世界纪录跨度的钢拱桥。300 米以上拱桥一般都采用桁架拱以减小拼装重量



图 9 施工图

以利悬拼施工。上海卢浦大桥大胆地采用了倾斜的箱形拱以获得“提篮拱”的美学造型。从侧倾稳定性的分析看，平行拱面也可获得足够的稳定安全系数，而在倾斜的拱面上进行重量达 480 吨的拱肋节段悬拼，确实是巨大的挑战。卢浦大桥的施工单位采用巨型临时塔吊和扣索系统，并通过大量压重措施，同时引进了国外的吊装设备克服了困难，使拱肋得以合拢。在上海的软土地基上修建大跨度拱桥必须采用强大的系杆平衡拱的推力。在施工中将有多次体系转换，将临时扣索的拉力转移到水平的系杆拉索中去。施工全过程的控制技术应当是一项非常具有特色的创造性工作。(图 9)

拱肋是一个钝体断面，虽然拱的空气动力稳定性是十分安全的，但在均匀流状态的风洞试验中观察到拱肋的强烈涡振。虽然城区的湍流强度较大可能会抑制涡振的发生，但仍通过计算流体力学方法选择了一种效果最好，又不影响美学的“隔离膜”气动抑振措施，在拱肋上预设了今后视需要安装隔离膜的连接装置(图 10)。而且，在拱顶处的观光平台已部分地起到了对涡振的抑制作用。



图 10 隔离膜

从桥梁建成后的效果看，虽然多费了一些钢材和施工费用，经济指标并不好，但却证明了 500 米以上箱形拱桥也是可行的。与古典的桁架拱相比，箱形肋拱可能更具有现代气息。

3. 润扬长江大桥（2005）

主跨 1490 米的润扬长江大桥南汊悬索桥是中国最大跨度悬索桥。在江阴长江大桥经验的基础上建造润扬长江大桥，应该说上部结构的难度不大，主要的挑战来自基础工程。50 米深的北锚碇采用嵌岩的地下连续墙(图 11)。虽然地下连续墙施工在建筑工地是成熟的技术，但对于平面尺寸为 69m×50m 的巨大桥梁基础仍是一个挑战性的任务。运用信息化的施工方式，对连续墙体和周围土体的各种信息进行实时的监控和正反演分析，保证了基础施工的快速和安全。

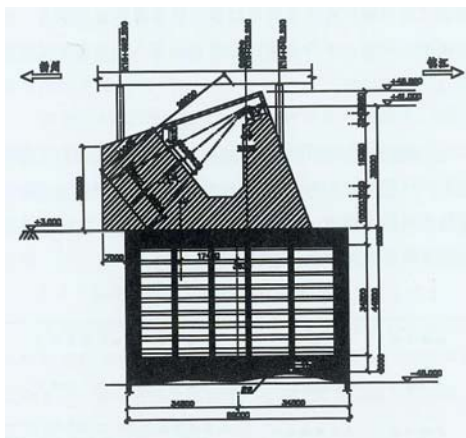


图 11 北锚碇



图 12 中央稳定板

同样，南锚碇所采用的冰冻法技术是传统的煤矿竖井施工技术，但在大尺寸的桥梁基础中使用也是一项大胆的创举，承担了巨大的风险。施工中通过排除险情，终于获得了成功。桥塔施工中引进了国外的模板技术，大大提高了混凝土的外观和内在质量，取得了进步。由于选用的桥面高度较小，虽然可减少侧向风载，但也降低了扭转刚度，使抗风稳定性尚不能满足要求。首次采用中央扣和中央稳定板的措施解决了这一问题(图 12)。

主缆的防腐首次引进了日本的干空气除湿新技术。此外，在锚碇、基础、索塔、桥墩和引桥箱梁等混凝土工程中都采用了添加粉煤灰的技术，提高了耐久性，可望保证大桥 100 年的使用寿命。

4. 南京长江三桥 (2005)

南京长江三桥采用人字形弧线的新颖塔型。应当承认这是从香港昂船洲大桥国际竞赛的第二奖方案中得到的启示。为了加快施工速度，桥面以上的塔柱采用钢结构，以便于在工厂精确制造，同时也带来了上下塔柱连接处钢混结合段的构造难题。经过研究，选择了在钢塔柱上开孔，与穿过的钢筋和现浇混凝土形成 PBL 剪力键，作为传递荷载的主要构件(图 13)。矩形钢塔柱截面经过风洞试验选择了最佳的切角处理以抑制可能的驰振和涡振。可以说，南京三桥的钢桥塔是一项有创意的设计。

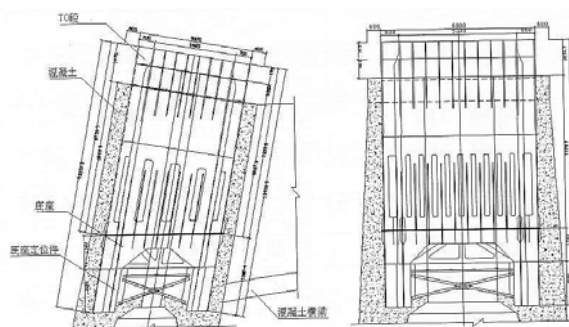


图 13 钢塔连接构造

塔位处的水深超过 40 米，进行传统的钢套箱施工有较大的风险，通过精心组织顺利完成了基础施工。高 215 米的钢塔柱的空中安装，邀请了有经验的法国公司承担，顺利实现了封顶。虽然钢塔柱较一般混凝土塔顶费用高，但获得了施工速度快的回报。

5. 上海东海大桥 (2005)

东海大桥是我国第一座在广阔海域建造的大桥，具有里程碑意义，并将为今后的跨海大桥建设提供宝贵的经验，如正在建设的杭州湾大桥、拟建的港珠澳大桥以及计划中的渤海-琼州海峡工程。为了使洋山深水港尽早开港，提高上海航运中心的国际竞争力，在短短的三年半时间里，东海大桥建设者面对海上环境恶劣、大型预制构件的整体吊装以及保证 100 年使用寿命等挑战，克服了重重困难，按期完成了任务(图 14)。



图 14 全景图

通过研制海上混凝土及各项防腐技术和设计措施，提高了在海洋环境下混凝土的耐久性。装备了 2500t 浮吊，将大型混凝土预制构件(承台、墩身、箱梁)的整体吊、运、装能力从过去不足千吨提高到 2000 吨的较高水平，而且保证了工程质量(图 15)。在海域施工必须采用 GPS 定位技术，建造大型耐风浪的施工平台，在施工管理上也要通过创新加以变革才能保证施工的顺利进行。



图 15 浮吊安装

东海大桥的二座斜拉桥虽然跨度不大，但都采用具有创意的设计，主航道桥采用单索面和结合箱梁桥面配以倒 Y 型桥塔的布置(图 16)，而颍珠山桥则采用平行索面的结合梁桥面，桥塔的上横梁则采用轻型的钢管横撑。全桥统一的桥面铺装和新型伸缩缝为大型集装箱车通行提供了优良的行车条件。



图 16 主航道桥

四、 国内外创新理念的比较

前面提到在桥梁工程领域中，迄今为止的原始技术创新大都是由发达国家所创造的。我们在学习和引进中实现了技术和集成创新或者结合国情的再创新。中国作为发展中国家，在技术发展的进程中落后于发达国家，存在着差距，这是我们必须承认的现实。建造一座桥梁都要采用各种技术，而技术有先进和落后之分，采用几十年前的落后技术也能建造出今日的新桥。因此，引进和采用先进技术，为克服出现的问题或适应特殊的条件创造新的技术是每一个工程师应当树立的创新理念。从前面介绍的国外新建桥梁中，希腊 **Rion-Antirion** 桥的“加筋土隔震基础”、法国 **Millau** 桥的多跨连续“斜拉桥顶推施工”技术以及美国旧金山新海湾大桥的“剪力键抗震塔”都是结合当地特殊条件的创造性设计，是真正意义的技术创新。

反观中国的新建桥梁所作的技术总结，更多地是强调规模和尺度，希望在跨度上取胜，在“第一”、“之最”和“首次在国内采用”上做文章。这是一个误区，因为仅仅尺度的超越并不就是技术的创新和超越。从前面介绍的几座中国新建桥梁中，可以看出：上海卢浦大桥的拱肋悬拼施工工艺、润扬长江大桥的南北锚碇基础、南京长江三桥桥塔的钢混结合段构造设计以及上海东海大桥的海上一体化施工技术都是具有相当难度的关键技术问题，建设者通过非常规

的分析、研究、试验验证以及特殊设计和施工考虑解决了难题，取得了具有创新意义的成绩，并对后继工程产生指导意义。

技术以发明和创造为核心，并通过发明和创造使某一专业技术不断推陈出新，不断向前发展和进步。国外的一些著名设计公司都在国际设计竞赛中获奖或中标，而著名的施工企业则掌握了许多技术发明专利，并主持重大国际工程建设。这些品牌企业的技术领导人都在国际学术组织或重要国际会议中发挥主导的作用，这也正是强国的标志。我国在改革开放二十余年来虽然取得了令世人瞩目的进步和成绩，但在国际化和国际竞争力方面仍有明显的差距。

我衷心希望年轻一代的桥梁工程师一定不要满足于规模大和速度快的成绩，而要在创新、质量和美学上下功夫。要抓住中国大规模桥梁建设的机遇，加强创新理念，努力进取，争取每做一项工程就有一、二个技术发明和创造，在新材料、新体系、新结构、新工法、新理论和新方法上有所突破。这样，中国桥梁的进步将更快更扎实。同时还要学好外语，到国际舞台上去表演，宣讲我们所取得的创新成果，因为只有真正创新的成果才能赢得国际同行的赞服，才能真正提高中国桥梁的国际地位；只有在和国际同行的竞赛中获胜，才能实现真正意义上的超越，才能从桥梁大国成长为真正的桥梁强国。

参 考 文 献

- [1] 国际桥协(IABSE)2004 年大会论文集, 2004, 上海
- [2] D. Goodyear, J. Sun. 旧金山斜拉桥设计中的新进展. 《公路运输文摘·桥梁》. 2004 年专刊第 1 期
- [3] 孟凡超: 南京长江第三大桥及其创新设计. 《公路运输文摘·桥梁》. 2004 年专刊第 1 期
- [4] 十六年磨一桥—120 年内保安全的米约大桥. 《公路运输文摘·桥梁》. 2005 年专刊第 1 期
- [5] “大跨径桥梁创新技术论坛”专集. 《公路运输文摘·桥梁》. 2005 年专刊第 2 期
- [6] 项海帆: 中国桥梁科技发展战略思考. 《公路运输文摘·桥梁》. 2005 年专刊第 3 期
- [7] 东海大桥 9 大解读. 《公路运输文摘·桥梁》. 2005 年专刊第 3 期
- [8] 周世忠: 一座具有挑战性和创意的桥梁—希腊 Rion-Antirion 桥. 《公路运输文摘·桥梁》. 2005 年专刊第 3 期
- [9] J. Combault 等: Rion-Antirion Bridge, Greece—Concept, Design, and Construction, Structural Engineering International (SEI). Vol. 15, No. 1, 2005
- [10] M. Virlougeux 等: Recent Structures Worldwide: An Introduction Millau Viaduct, France, Structural Engineering International (SEI). Vol. 15, No. 1, 2005