

铁 路 钢 桥

—设计 和 制造

钱冬生 夏建国

西南交通大学出版社
1994年12月成都

简 介

本书是从实用和培养能力这两者出发:

——对于单线铁路下承栓焊桁架梁桥的构造和设计,叙述从详;

——对于连续桁架梁桥特点、杆力分析(简捷手算法)、上拱度计算,有独到的论述;

——对于钢桥制造工艺,结合我国经验,指出关键所在,给出系统介绍;

——对于铁路钢桥历史经验和教训(特别是事故)、当代成就,择其有代表性者适当阐发;

——对于 TBJ 2—85,即铁路桥涵设计规范,在构造规定和计算原则两方面均遵照办理,但在表述方面有改进;对于桁架梁桥各共同作用和二次应力,现不拘囿于算式推导,而是采用逐步逼近法,使物理概念清楚,借能方便地扩大各该方法的应用范围。

本书文辞简练,论点明确,析理细致,内容全面,具有良好的可读性、参考性。适合于工程界和高等学校对于钢结构、钢桥有兴趣者学习或使用。

(川)新登字 018 号

铁 路 钢 桥

——设计与制造

钱冬生 夏建国

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 九里堤)

新华书店经销

西南交通大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 10

字数: 220 千字 印数: 1—1000 册

1994 年 12 月第一版 1994 年 12 月第一次印刷

ISBN 7—81022—754—8/T·131

定价: 7.80 元

目 录

第一章 铁路钢桥在历史上的发展

一、桥的功能和现代桥梁的出现	1
二、铁桥和钢桥在 1890 年之前的发展	2
三、在 1890—1945 年间的发展	6
1. 北美洲在 1918 年之前的巨大成就	6
2. 关于桥梁设计规范在 20~30 年代的修订	8
3. 铺设电车轨道的城市桥	8
4. 我国在 1937 年建成的钱塘江桥的历史功绩和建桥人茅以升	9
四、从 50 年代以来的发展	10
1. 当代桥梁的特点及其在铁路钢桥的应用	10
2. 桥梁事故和桥梁设规	11
3. 我国铁路钢桥的主要成就	12

第二章 铁路简支钢板梁桥和结合梁桥

一、上承铆接钢板梁桥构造	15
1. 上承钢板梁桥的组成	15
2. 明桥面	15
3. 铆接板梁截面	17
4. 平纵联和横联	18
5. 主梁挠度和上拱度	19
6. 顶梁措施	19
二、上承焊接钢板梁桥构造	20
1. 焊接板梁	20
2. 平纵联和横联	21
三、上承钢板梁桥的基本计算	24
1. 主梁计算	24
2. 平纵联和端横联的计算	24
3. 横向抗倾覆的稳定验算	25
四、下承钢板梁桥简介	25
五、结合梁桥简介	27
习 题	30

第三章 单线铁路简支桁架梁桥的构造

一、下承桁架梁桥的组成, 桥面系、平纵联同主桁弦杆共同作用简述	31
---------------------------------	----

二、主桁架梁的腹杆体系, 主要尺寸, 上拱度设置	32
三、主桁杆件, 主桁节点板, 弦杆的工地拼接	34
四、下承桁架梁桥的桥面系, 平纵联, 桥门架	37
五、下承桁架梁桥的节点构造	41
六、上承桁架梁桥的构造简介	43
七、支 座	45
八、检查设备	47
习 题	48

第四章 单线铁路简支下承桁架梁桥的结构计算

一、总 说	50
1. 内力分析	50
2. 截面验算	50
3. 桥涵设规的有关规定	51
4. 本章内容	51
二、简支下承桁架梁桥的基本验算	51
1. 主桁的杆力	51
2. 主桁杆件的截面选择及验算	55
3. 腹杆杆端连接和弦杆的拼接	57
4. 纵梁、横梁和主桁挂杆	58
5. 主桁梁的挠度和上拱度	59
三、简支下承桁架梁桥基本验算举例 ($L = 64 \text{ m}$)	60
1. 杆力分析	60
2. 杆件验算	61
3. 腹杆杆端连接和弦杆拼接	63
4. 纵梁计算	65
5. 横梁计算	66
6. 挂杆计算	67
7. 主桁挠度和上拱度	67
四、平纵联和桥门架	68
1. 《桥规》关于横向风力和列车横向摇摆力的规定	69
2. 平纵联在风荷载作用下的内力分析	70
3. 平纵联和弦杆的共同作用, 平纵联杆件验算	72
4. 桥门架	74
五、共同作用和二次应力	77
1. 桥面系和下弦杆的共同作用	77
2. 中间横联和横梁的共同作用	80

3. 节点刚性所生的二次应力	82
六、节点板和弦杆拼接的补充计算	89
1. 节点板的计算	89
2. 弦杆拼接的补充计算	90
七、铸钢支座计算	92
习 题	95

第五章 连续桁架梁和悬臂桁架梁桥

一、简支、连续和悬臂桁架梁桥的对比	96
二、连续桁架梁桥主要尺寸及主要构造	97
1. 分联及分跨	97
2. 主桁高度、节长和腹杆体系	98
3. 主桁中距	99
4. 中间桥门架	99
5. 纵梁断开和制动撑架设置	99
6. 连续桁梁活动端的构造	100
7. 固定支座处的节点	100
8. 中间支承节点	101
9. 关于上拱度和反力调整	101
三、悬臂桁架梁桥主要尺寸及主要构造	102
1. 分跨及桁高变化	102
2. 腹杆体系	103
3. 平纵联和主桁中心距	104
4. 悬挂跨端头的挂杆	105
5. 锚杆和锚墩	105
四、连续桁架梁的基本计算	106
1. 连续桁架梁反力影响线的简捷计算	106
2. 端跨度弦杆和腹杆内力影响线	108
3. 中间跨度的杆力影响线	109
4. 关于杆件截面的初步选择	109
习 题	109

第六章 钢桥制造

一、料件(即零件)加工	112
1. 作样及号孔	112
2. 号 料	112

3. 切 割	112
4. 杆件矫正	113
5. 制 孔	114
6. 边缘加工	115
7. 精密烧切(优质快速焰切)	115
二、组 装	116
1. 铆接钢板梁的有孔自由组装	116
2. 铆接工形杆的无孔组装	116
3. 焊接工形杆及板梁的组装	117
4. 铆接纵、横梁的胎型组装	117
5. 焊接纵、横梁的先钻(工地)孔,后组装	117
6. 联结系节点的组焊	118
三、工厂打铆	118
四、工厂焊接	119
五、杆件矫正	119
六、工地孔眼	120
1. 平面式钻孔套样板	120
2. 立体钻孔套样板	121
3. 数控钻床简介	121
七、除锈及涂漆	122
习 题	123
附录一 铁路标准及通用设计钢桥资料汇总表	125
(一) 钢板梁桥	125
(二) 钢桁架梁桥	126
附录二 中活载换算匀布活载	127
附录三 中心受压钢压杆容许应力 (16 Mnq 钢)	128
附录四 用虚梁弯矩比拟实梁挠度的简捷手算法,及其在连续桁架梁内力 分析和上拱度计算中的应用	129
本书所用计量单位的说明	140
参考文献	141

第一章 铁路钢桥在历史上的发展

一、桥的功能和现代桥梁的出现

在地球上，有水、有陆、有空。在水、陆、空领域进行运输，主要有五种方式：水运、铁路、公路、空运、管道。

铁路和公路，这是主要的陆运方式。当陆运线路需要跨越一有限空间，以保持其连续性时，一般是使用桥梁。所需跨越的空间，最常遇到的是溪、沟、山谷、河流、湖泊、沼泽、海湾；而在高度不同的陆运线路彼此相交或相通之处，桥梁则用于跨越另一线路（或留作其他用途的空间）。由此可见，桥的功能就是肩负线路荷载越过空间，以保持线路的畅通。线路荷载，包含：使用活荷载（汽车、车辆、列车、乃至行人等使用桥梁者的重量和冲击力）、桥梁的结构重量（即自重）、其非结构的重量（路而铺装、道床、人行道栏杆、照明和安全设备等）。此外，桥梁结构为保持其自身的存在，还必需能够安全承担风荷载、温度影响力、水流冲击力、乃至不常遇到的地震力、船舶撞击力等。

铁路和公路，都起源于路。在没有机动车的历史时代，为了行军和通商，在平原地区曾经修建过一些宽阔的路（例如，我国秦代的驰道、直道，欧洲古罗马帝国的大道），也修建过一些永久性桥（例如，河北赵县的大石拱桥）。在物质文明史上，那是先有蒸气机，后有内燃机。于是，铁路蒸气机车在19世纪20年代出现，而使用内燃机的汽车是在19世纪后叶（1875年）方才出现。

铁路的特点，是其有钢轨。钢轮对钢轨，滚动摩阻力小。这就有利于多拉、快跑。摩阻力小，这还涉及到滑动摩阻力也小；于是，铁路的坡度不能陡；最好是在0.6%左右或再平一些，像宝成铁路陡达3.0%的情况，那是使列车运行相当困难的。跑快了，弯道半径就不能小，一般是使半径达600 m、800 m或更大；山区铁路将曲线半径降到300 m乃至更小，那是迫不得已。当铁路运输在英国开始出现时，火车头的重量只是十多吨。只因其潜在的“多拉、快跑”得到重视，并且逐步被发挥了出来，到本世纪初年，重量达150多吨的火车头、载重量1000~3000吨的列车业已较常出现。在幅员广阔的国家，货物运输和旅客运输的大部分需要用铁路来担负，这在本世纪就成为现实。

公路，没有轨道，其适应性强。它可以伸展到我们每一家、每一工厂、每一单位的门口乃至后院。若运量是在两三吨之下，距离又不算长，需要从门到门的运输，则使用汽车就是最合适；这时，即使公路坡度较陡（短段达5%~7%）、半径较小，也不算是问题。如若需要用高速度进行长距离的旅客运输、乃至某些货运，那就需要按国道、或高等级公路的标准来修建公路——其上、下行要分开，要用“立体交叉”的方式穿越其他线路；弯道半径要大，使驾驶者能够看得较远；坡度则可以比铁路的标准稍宽。如若需要运送重达300吨左右的大件货物，则其桥梁就应该照这需要来设计；而对于大多数公路桥梁讲，按一辆汽车的毛重是15吨、20吨或30吨来设计，那就能满足常规运输。（请参看现行《公路工程技术标准》）

在历史上,当铁路桥开始修建时,造桥的材料还只限于木材、砖、石、铸铁,其后才有锻铁型材(板、角铁),到19世纪70年代才有钢。设计桥梁所需的力学知识,其初是处在逐步形成、逐步完备之中。桥梁设计规范,其初并没有提上日程。绝大多数建造桥梁的实干家,在那时还都没有什么工科大学可以去上,还都需要沿着前人的足迹前进,自学成才。稍有不慎,就会遭逢失败。大致是到19世纪最后十年,具有下列四种特征的现代桥梁(modern bridges)方才鲜明、完整地出现:

材料 钢(随后则增加了混凝土);

桥梁上部结构 以桁架梁和桁架拱为主,但小跨度是用实腹梁,而列车重量不大时则还用悬索桥;

结构设计 依靠力学(进行内力分析和截面设计);

施工工艺 使用蒸气机、空气压缩机这些动力机械,采用沉井、沉箱、打桩这些方法修建深水基础,采用打铆机具及吊机安装钢结构。

回顾其历史,可以明确地讲:造桥必须依靠科学技术,否则就是失败频仍!先是有造桥的实践,而后才有逐步完备起来的桥梁规范和桥梁工程教育。生产实践是基础,是源泉;如若脱离了生产实践,后两者都要落空。这乃是工程得以发展的客观规律,是应该记取的。

在历史上,公路钢桥出现在铁路钢桥之后。在适应公路的蓬勃发展 and 多样化需要之中,到本世纪30年代,铁路桥梁原先占有的各种大跨度纪录就逐步让位给公路桥。

现将铁路钢桥发展史分为三个阶段介绍如下。

二、铁桥和钢桥在1890年之前的发展

为了开发资源、振兴经济,幅员大的国家更加需要铁路。据美国 *Engineering News*, v 23, p 373, Apr. 19, 1890, 在1879—1889年这十一年,其铁路里程从13.1万公里增至25.0万公里,所发生的桥梁事故总计286件,其中属于铁桥的事故是43件。按年进行平均,每年发生铁路铁桥事故将近4件。将里程考虑在内,每年每5万公里出现铁路铁桥事故一次。但这一类统计资料,似乎还不如某些具体事例更能发人深省、触目惊心。今举三例如下:

(1) 英国1847年5月24日在Chester的Dee河桥事故。死亡5人。这桥包含3孔,跨度都是29.9 m。这桥的各个跨度是用铸铁制成工形截面的若干梁段,拼装成上弦,下加两根短立柱,再用锻铁作下弦,组合成双柱式的简支型桁架梁。桥成之后6个月,就发生这一事故。设计所用公式,是由E. Hodgkinson用跨度3.05 m的模型梁做试验而推出的经验公式(当时没有人会进行这种桁梁的内力分析)。这桥的事故曾经在英国工程界引起很大震动。曾邀集将近10名专家讨论,还在现场做了不少高速行驶车试验(因为有些专家认为这事故是由高速行驶车的冲击力所致)。事隔若干年之后,按结构工作者现今的看法,方才肯定地说:该桥的上弦杆不直(当时的制造质量只能是那样,并且还有初始旁弯矢度为76 mm的纪录),梁因总体失稳而丧失承载力,是出事的主因。

(2) 美国1877年12月Ashtabula铁桁架桥断裂下落事故。在梁桥下落之后,列车逐节下落,死亡92人,伤64人。梁的跨度是50.3 m,建成于1865年。桁梁是Howe式(参看第三章之二关于腹杆体系的论述)。对于事故的主因,有记载是说:列车的主动轮将离梁

一端 6.6 m 处的铸铁上弦杆撞毁。但现在也有人从该梁已使用 12 年立论,说它是由于疲劳。

(3) 英国 1879 年 12 月 28 日 Tay 河口锻铁桁架梁桥事故。十三孔跨度 75 m 的桁梁,连同行驶于其中的列车(火车头,及 6 节车厢),被风刮落桥下,旅客和车上工作人员无一生还,死 75 人。这桥计有 85 孔,大部分是拼装为连续结构。其桁梁高度较大,桁梁是支承在铸铁柱上。各铁柱又是立在砖砌的、混凝土填芯的桥墩上。这桥是在 1878 年 6 月 1 日开通(寿命是 19 个月)。因其工程浩大,曾经号称奇观。事故发生后,立即组织专家调查。但也是在事隔多年之后,才能冷静地对事故原因作出客观分析。该桥用于抵抗风力的支撑系不连续,用做支撑系的拉杆的铸铁件环眼质量不好。这些拉杆在振动时彼此碰撞(表示松弛及受力不均),养桥人员早就有所反映,而工程师则不以为意。到底是按多大的风压来进行这桥的设计,主持这桥的工程师实质上是回答不出来。这就足以说明这桥的所以失败——是一支支撑系不良的桥被风的静压所推翻。

以上这三件事都是在运营期间发生,且桥的跨度不超过 75 m。结合着其他桥梁事故来看,可知:在力学知识还未曾被工程师们掌握时,一般跨度桥梁在交付运营之后,其安全性仍是使人担忧的。而在这期间,一些创跨度纪录的大桥却因工程师们的殚精竭虑而终于建成,并且经受得住多年营运的考验。它们已经成为历史名桥。现介绍 4 座如下:

(1) 英国 1850 年建成的 Britainia 锻铁巨型箱管连续梁桥。建桥主持人是 Robert Stephenson (他是火车头发明人 George Stephenson 的儿子)。这是双线铁路桥。成桥的分跨是 $70 + 140 + 140 + 70$ (m)。在决定桥式和架桥方案时,原是想用悬索桥。由于悬索桥刚度不足,对铁路桥不会适用,乃决定让它采用强劲的加劲梁。以进行结构试验见称的 W. Fairbairn 承担设计这桥所需的模型试验工作,还有数学家 E. Hodgkinson 帮同分析及推论。曾用小比尺的模型对加劲梁截面进行比较(就圆管 12 根、椭圆管 7 根、矩形管 14 根进行试验),从而证实矩形截面最合用。还按 1:6 的比尺制成模型梁 6 根做试验。在试验之中,板的局部失稳是第一次被发现。乃试行采用加劲肋以制止局部失稳。经发现:当肋的形状及布置合适时,在加劲肋方面增用铁材 20%,可使箱梁承载力增加 150%。为了使桥刚挺,要增加梁的高度;最终使用的箱梁总高达 9.09 m,让列车从箱中驶过,如图 1—1。两根箱梁并立,以适应双线行驶需要。造桥材料是锻铁(当时用于造船者)。因为从一开始就想用悬索桥,在模型试验中虽然发觉箱梁本身的刚度业已足够,但还想利用悬索来进行钢梁安装,乃将悬索桥所需的石塔在三个桥墩上都造了起来。后来,由于悬索的价格太贵,这才决定将梁逐孔拼好,浮运到跨度,再用千斤顶提升就位,而后再将相邻跨度用铆接连接起来,使梁成为连续式。这桥的每线每米用铁量,大致是 9.2 t。其运营性能良好。所行驶的列车重量曾达到其开通时的 12 倍!可惜在 1970 年 5 月 23 日,有两个小伙子闯进箱管,将注油的桥枕点燃了一把火,遂使这历史名桥在享寿 120 年之际毁灭。(嗣经就原桥位修建双层桁架拱桥;1972 年 1 月,其铁路部分开通;1980 年,其上层三车道公路开通)

(2) 美国 1855 年建成的尼亚格拉河悬索桥。建桥人是德国的移民 John A. Roebling。这桥的四条大缆是用平行锻铁丝在空中编制的(这一空中编制法是 Roebling 在 1841 年取得专利的)。塔是石砌的。加劲梁是木桁架梁。跨度达 250 m (这是一个创纪录的数字)。据建桥人说:实际造价是在箱管铁桥的 10% 以下。就历史条件看,新大陆正处于被荆斩棘的创业阶段,他们不采用老牌资本主义不怕花钱的做法,洵属正确。为制止悬索桥振动, J. A. Roebling 就在大缆之外,还像斜拉桥那样布置很多根斜拉索。这桥开通时,一列总重 368 t (火

车头重量 28 t 的列车就稳稳地驶过。在其运营中，曾加固几次，将木桁梁改为钢桁梁。一共使用 37 年。由于活载不断增加，到 1892 年，这桥乃用一跨度 168 m 的钢拱桥来取代。

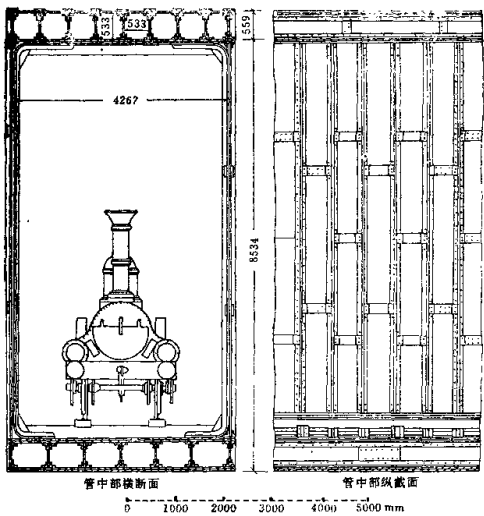


图 1-1 英国 Britania 巨型箱管梁的截面及立面, 1850 年

(3) 英国 1859 年建成的 Saltash 锻铁桁梁桥。建桥人是 I. K. Brunel。计两跨，跨度都是 138.6 m。其水下基础是用直径 10.6 m 的锻铁圆管形压气沉箱来施工的。其每一跨度的桁架梁呈鱼腹形，上弦截面是椭圆形锻铁管，在立面上形成拱肋；下弦是用扁铁所制成的悬索（线型同悬索桥大缆相似）。将上弦拱肋的水平推力交付给下弦悬索的拉力来平衡，使桥墩不受水平推力，这乃是其匠心独运之处。腹杆呈交叉式，它们只承受局部的荷载。这桥每一跨度的重量是 1060 t（合每米 7.6 t），是整跨浮运到桥下，提升 30 m 而就位的。它至今健在，寿命已超过 120 年。“祖父的祖父所造的桥，我们还能使用，我们所造的桥就应该让孙子的孙子也能使用，那才公道。”英国 1962 年版钢梁桥规范（BS 153）取 120 年为疲劳验算所用的钢桥寿命，当时就曾这样解说过。（为孙子的孙子着想，那就是为四代人着想，每代按 30 年计，那就是 120 年）

(4) 美国 1874 年建成的圣路易密西西比河无铰桁架钢拱桥。建桥人是 James B. Eads。这桥共计三孔。跨度是：153、158 及 153 m。它是双线铁路及公路两用桥（分为两层，上层公路，下层为铁路）。计有桁架拱 4 片；每片桁架拱的上、下弦相距 3.66 m。弦杆截面是钢圆管，外径 458 mm，壁厚 6 mm。美国人自豪地称这桥曾经创了五个“纪录”：①在用压气沉箱下沉到水下 30.0 m 方面，创了深度纪录。②在铁路拱桥方面，创了跨度纪录（若将无铰这一特点算上，那还是至今没有遇到对手，因为，无铰将使温度影响力提高，不经

济，而这桥因为桁高只是 3.66 m，是跨度的 1/42，影响乃较小)。③在上弦和下弦都使用钢圆管方面，是第一次。④在钢材质量还受怀疑的情况下(英国在上世纪 70 年代还不许桥梁采用钢材，只许用锻铁)，这桥的主体结构首先有一部分采用了高质量的合金钢。⑤在桥梁安装之中，第一次采用了悬臂拼装法。见图 1—2，为了在悬臂拼装之中使用临时斜拉索，在桥墩和桁拱之上设立了木塔和木排架。在钢铁生产还处于开创阶段、大型钢材还没有同世的情况下，由于采用桁架拱，就能使用较短、较轻的杆件；而在对桁架拱内力还不会分析的情况下，就能使干线铁路桥梁跨度达 150 m 之上，而且保证其刚度，这确实是一巨大成就。这桥至今健在。

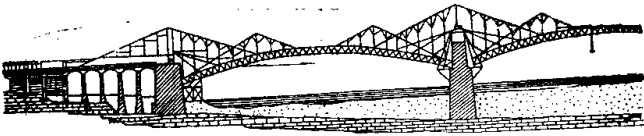


图 1—2 美国圣路易铁路钢桁架拱桥的悬臂安装，1874 年建成

在各桥成名的同时，铁路铁桥的大量事故仍然在使社会十分震惊。舆论的压力、工程师的责任感、严峻的优胜劣汰法则，都迫使桥梁工程师不得不努力学习力学理论。于是，桥梁发展史也就因此而翻开了新的一页。而英国在 1880—1890 年历时十年所建成的福斯湾双线铁路悬臂桁架梁桥便是其标志。它是地道的、具有前述四项特征的现代桥梁。

福斯湾铁路桥全长 1625 m，其中包含两孔各长 521.3 m 的长跨。全桥用钢 54000 t，每米用钢量达 33.2 t (双线)。因为 Tay 河口桥桁梁被风刮落事故刚刚发生，这就难免要矫枉过正。在经过一些风压实测之后，就将这桥的设计风力订为 2681 Pa (这是一个很难大而积出现的高值风压)！为增加对横向风力倾覆的抗力，就让这桥左、右两片桁梁向内斜置。这悬臂桁梁的中间“塔式”支承有三座，这些支承在桥的纵向尺寸分别为 40 多或 60 多米，它们被称为“塔”。塔高(即桁架高度)是 102 m，塔底宽度(即左、右两支座的中距)是 36.6 m，塔顶宽度(即左、右上弦节点中距)是 10.1 m。桁架的压杆截面，取圆管形；塔柱的截而达到最大，外径达 3.66 m，管壁是由 1370×32×4880 (mm) 的钢板所拼制而成。拼制之前，用 2000 t 压力机将钢板热压成圆柱面，再将这些钢板围在(圆柱状)芯模之外，连同拼接板及加劲肋进行组装，再用钻床来钻孔。随后就拆卸开来，运到桥位，并用提升能力只是 2 t 的吊机将它们吊装到位，就地拼砌成杆件(使用了水力压铆机)。这桥的立面图，见图 1—3。采用悬臂拼装法，在悬挂跨和伸臂之间增添临时杆件，借能从桁梁根部(桥塔)

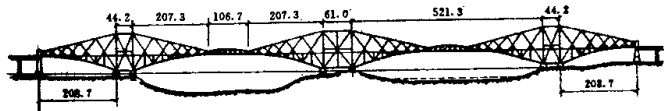


图 1—3 福斯湾铁路悬臂桁架梁桥，1890 年

拼到跨中，在合龙之后再临时杆件拆除，使结构体系转变为静定的悬臂桁架梁。因为它是静定结构，按照力学分析，其杆力很明确。工程师能够不再因为不会内力分析面使自己对桥的安全性胸中无数，可以由这桥的成功给出响亮回答。

三、在 1890—1945 年间的发展

这期间发生了两次由帝国主义挑起的世界大战（第一次是在 1914—1918 年，第二次是在 1938—1945 年）。对于卷入大战较深的国家讲，战前要为备战而耗费巨大财力，在战争前要承受灾难性破坏，在战后还要医治战争创伤。所以，战争必然要迅速改变国际力量的对比，这已为历史所不断证明。

1. 北美洲在 1918 年之前的巨大成就

简支和连续桁架梁、钢拱桥，其全世界的跨度纪录，在这时期都是在第一次大战的主战场之外的北美洲，比较顺利地达到的。但由加拿大魁北克悬臂桁架梁桥所创造的跨度纪录，却是在历经两次重大施工事故之后方才取得。这座桥梁在已有前例（英国福斯湾桥）的情况下，竟然在施工之中发生灾难性事故，这是少见的。为汲取教训，本书将对它多讲几句。

(1) 美国 1916 年在伊利诺州建成的 Metropolis 简支桁架梁桥。跨度 220 m。大多数杆件使用硅钢。拉杆有一部分使用眼杆，采用镍钢。

(2) 美国 1917 年在俄亥俄州建成 Sciotoville 双线铁路连续桁架梁下承式桥。跨度 2×236.2 m。活载是 Cooper E 60 级（轴重 267 kN，匀布载重每线为 87.6 kN/m）。用钢量 12000 t（公制），合 25.4 t/m（双线）。（其桁梁主要尺寸见第五章之二）

(3) 美国 1917 年在纽约市建成 Hell Gate 四线（干线）铁路、道碴桥面、中承式双铰桁架钢拱桥。跨度 298 m。两片桁架拱的中心距 18 m。（在桥面水平处，设置平面纵向联结系抗风，风弦杆的中心距是 28 m）活载是 Cooper E 60 级。恒载是 770 kN/m。在立面上，拱呈提肩型（指在铰支承处，将拱的桁高加大，使拱的上弦呈反弯曲线，犹如我国驼背石拱桥栏杆的线型）。以拱的下弦为准，矢跨比是 1:4.5。用钢量是 17200 t，合 57.7 t/m（四线）。钢的含碳量是 0.27%~0.34%，属于中碳钢。最重的杆件重量是 180 t。采用悬臂安装。在安装时所用的临时锚系结构总重达 15500 t，但因尽量利用尚未安装就位的钢料（含引桥钢梁），所增添的新钢料仅是 2300 t。在这桥一端的基础施工中，曾使用直径 5.5 m 圆形压气沉箱 15 个， 9.1×10.2 (m) 的矩形压气沉箱 6 个，沉箱下沉深度 11.2~32.6 m，基底落到石灰岩、片麻岩和不透水粘土。在基础范围内，岩石有宽度为 4.5~18 m 的裂隙，隙内是粘土和漂石。按原设计，圆形沉箱用于传递竖向力，矩形沉箱用于传递水平推力。对于岩石裂隙，后来是在矩形沉箱之间修建混凝土拱来跨越，拱的施工方法是先修拱座，然后一面开挖，一面灌注拱圈。

(4) 加拿大 1918 年在魁北克建成双线铁路悬臂桁架梁桥。早在 1887 年，就成立了魁北克桥梁公司，作为这桥的建设单位。这公司的总工程师从来没有修建长跨桥的经验，预算却抠得很紧。而承包这桥设计的单位也是没有经验的。于是，建设单位不久就聘请美国著名桥梁专家 T. Cooper 当顾问。T. Cooper 在青年时期曾经是 J. B. Eads 修建圣路易钢拱桥时一名很出色的驻桥工程师；美国铁路标准活荷载至今还是用他的姓来命名，当英国修建福斯湾悬臂桁架桥期间追加预算时，他曾十分自负地讲：“若是让美国人来修建，预算非但不需增加，还应该削减一半。”T. Cooper 这时业已年近古稀。建设单位所给予的顾问费较低，他并不计较。可是，他却因此而无法维持一个足够的称职的工作班底，迫使自己要数不少原应由助手来做的事。他的办公室是在纽约。由于健康原因，长期不到工地。在顾问所派的驻桥代表和建

设单位的驻桥人员之间,职责分工缺乏明确规定。原设计的主跨长度是488 m, T.Cooper 从其使气压沉箱下沉深度应受限制出发,在1899年建议改为548.6 m,当即得到了建设单位同意。1900年,基础开工。上部结构设计的图纸是照跨度548.6 m修改了,但对恒载的估计值并未认真修正。还因为1908年是魁北克建市300周年,曾经有人非正式地倡议:这座桥在那时要开通。这也难免要使部分人员沉不住气。对于钢压杆设计,那是将Rankine公式运用于缀条式组合压杆,其依据则是Bouscaren在1880年发表在Trans. ASCE上的文章,曾经做过7根小型缀条式压杆试验(然而那些试件所用的缀条却是很强的)。其下弦受压杆的截面根大:外廓是 1387×1715 (mm) (高 $\times$ 宽),在竖向有4道腹板(分枝),每道腹板由4层钢板的板束(总厚89 mm)所形成;在腹板的上、下缘设置翼缘角钢,另用角钢做缀条、并铆之于翼缘角钢,所有这些角钢的尺寸只是 $89 \times 76 \times 9.5$ (mm)和 $102 \times 76 \times 9.5$ (mm),相形之下,缀条自属薄弱。当年的钢桥制造质量是不高的。进入拼装的钢杆件在其出厂之前,并没有进行过试拼装。杆件各腹板的初始几何缺陷(不直、不平)是12~19 mm。在架设过程中,为了贪图省事,每每使装配螺栓、冲钉不足数,听凭拼接板松散、连接松动。1907年7月,两边的主要受压弦杆工地拼接已严重变形,但T.Cooper认为拼装工作仍能继续进行。到8月27日,因为屈曲变形发展迅速,T.Cooper的驻桥代表不得不离开工地,赶到纽约,向他汇报。但在驻桥代表离开工地后,建设单位的驻桥人员却下令继续拼装。在8月29日上午,当吊机向前一个节间行进时,9000 t钢结构(悬臂,连同悬挂跨的一部分)轰然坍塌了。在场工人是86名,幸免于难的是11人。事故调查委员会所提出的报告,其摘要曾刊登在美国Engineering News, v 59, pp 307—315, Mar. 19, 1908。委员会对于事故的主因说得很肯定:受压弦杆的拼接铆钉和组装缀栓有一部分还没有装上去,缀条过份单薄(它们不能将强大的腹板组合成一根杆件)。委员会还针对设计和对设计的管理提出七条建议,其要点是:在压杆设计中,必须将钢材布置得合理;所用的构造细节必须由工程师负责决定;对恒载的估计值,必须及时复核并改正;不应该一味贪图省钢(指设计人员在有几种可用作依据的办法时,挑选其最能省钢、但安全性较差的那一种);不应该任用不称职的人(对于不称职的人,即使给予警告,他们在大祸临头时也不知戒备);应该让设计时间充裕一些;对于这样重要的桥,应该再找一个合格的局外人来对设计进行复核。委员会因其在调查中得到T.Cooper等的充分合作而表示感谢。T.Cooper则面年迈,经不起这一打击而迅速辞世。

这次事故之后,美国人曾对拉杆、压杆、铆接强度等进行了不少试验研究。其土木工程学会钢压杆专门委员会的报告是发表在Trans. ASCE v 66, 1910和v 83, 1919—1920之中。经将这桥主要杆件的钢材改为用碳钢,重新做设计。在工地,经将桥址中心线向南移动20 m,重新修建基础。新的钢桁梁的锚跨和伸臂的制造和架设工作很顺利。其悬挂跨则是改用整体提升的方法来安装。1916年9月11日上午11时,当悬挂跨业已提升3.6 m之后,位于扁担梁之上、用于支承这悬挂跨的4个十字状铸铁支座之一突然被压碎,悬挂跨随即倾斜,由于惯性大,挡具被它撞毁,悬挂跨就滑落水中。当场有13人死亡。政府和承包单位随即抽派人员调查,并从扁担梁等所受的伤痕将出事原因查明。承包单位承担了这一事故的责任。经在一年之内另制一新的悬挂跨,仍用整体提升方法,但将铸铁支座改为铅板(易于压缩变形,但不会压碎),成功地完成了架设任务。1918年,这座桥开通。其立面图,见图1—4。它的跨度纪录,在钢桁梁这一桥式之中,将公路桥包括在内,至今仍是世界第一。这并不是由于工程界不能建造比它跨度更大的钢桁梁。实际情况是:跨度越大,费钢越多,在

深水基础技术已有很大发展的情况下，合理地布置深水桥墩，将跨度缩短一些，符合于经济原则。

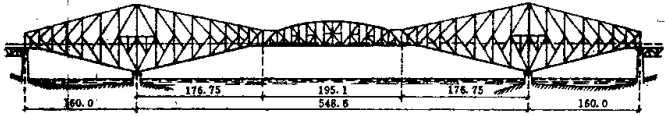


图 1—4 加拿大魁北克悬臂桁架梁桥，1918 年

2. 关于桥梁设计规范在 20~30 年代的修订

桥梁设规始终是在经历着一个从不完善到逐步完善、并且逐步适应桥梁建设迫切需要的过程。修订设规的依据，一是既有桥的运营经验，一是计算理论和试验研究成果的不断发展。修订的目的，在于较为普遍地提高桥梁设计质量，使工程师能够据之以设计安全可靠、但更加经济合理的桥梁。

在本世纪初年，在制定容许应力时，安全系数每被取作 4.0（相对于破坏强度）。在多次加载，而且有时还超载的情况下，桥梁也未见损坏。这就启发人们要作进一步研究。1923 年，英国成立一个桥梁应力委员会，在各国工程师的帮助下，他们探讨了不少问题，诸如：节点刚性引起的二次应力，桁梁和桥面系共同作用，荷载在桥面铺装层之中的扩散，冲击作用等。在 1928 年公布了它的报告。以此为依据，英国在 1929 年将钢桥容许应力提高 12.5%。

1926 年，德国铁路颁布其新的《铁结构规范》。

1923—1933 年，美国又成立了一个钢压杆研究专门委员会，进行了几十根大型钢压杆试验，在 Trans. ASCE v 95, 1931 和 v 98, 1933, 发表其报告，并为钢压杆推荐了正割公式。到 1935 年，美国在新版铁路钢桥规范中就采用了该式。

3. 铺设电车轨道的城市桥

在小汽车还不够普遍的情况下，在大城市附近几十公里范围内，发展电车交通是有其现实意义的。美国 1883 年所建成的纽约市 Brooklyn 悬索桥，跨度 487 m，其先就有电车，只是在 1952 年对原桥进行改造时，才将电车轨道拆除，改成只通汽车的桥。在 1931 年，在纽约市建成跨度达 1067 m 的华盛顿悬索桥，其原设计是在其上层设 8 线汽车道，在下层设 4 线电车道；但在 1931 年开通时只是修建了上层，其下层则是在 1962 年将下层电车道改为汽车道并补建完成的。在 1936 年，美国旧金山的海湾桥建成。将引桥包括在内，其结构的全长是 7010 m，以中央一岛为界，它包含东西两段。在东段内，有主跨是 426.7 m 的悬臂桁架梁桥。在西段内，有主跨都是 704.1 m 的三跨悬索桥两联首尾衔接。这桥是两层：上层公路行车道净宽 17.68 m（原拟通行 6 线汽车，后改为 5 线）；下层行驶有轨电车（上、下行各一线）及载货汽车。

1932 年，澳大利亚在悉尼港建成一跨度 503 m 的两铰中承式桁架钢拱桥。其两拱的中心距是 30 m。在桥的中央，设一宽度为 17.4 m 的汽车道；在汽车道两侧，分别设电车线各两

条（这两条各有一条是设在拱的外侧），再在电车线之外各设一人行道（宽 3.05 m）。这桥的立面是和美国 Hell Gate 桥相似。以下弦为准，拱的矢跨比是 1:5。按铅垂线计量，拱的桁架高度在跨中是 18.3 m，在支承铰处则是 57.3 m。进行悬臂拼装时，锚系结构只是用钢丝绳。各钢丝绳是通过凿在岩层内的马蹄状隧道而将锚系力传给基岩，钢丝绳的锚头全都是连接到拱桥端头的上弦节点。桁拱用钢量是 38000 t，主要是硅钢。在其悬臂安装、临近合龙之时，适遇狂风袭击。从两岸悬伸出来、各重约 19000 t、长约 255 m 的巨大悬臂以极低的频率在风中振动。可以认为：这是一场严峻的考验，但结果毫无损伤。设计所取的活荷载，要按加载长度而决定其活荷载集度。在进行钢拱弦杆设计时，假定全跨布满活载，其集度是按（全桥）180 kN/m 计。（虽有 4 线电车、加 17.4 m 公路行车道，但总活载只是稍高于双线干线铁路）

4. 我国在 1937 年建成的钱塘江桥的历史功绩和建桥人茅以升

从 1840 年的鸦片战争算起，帝国主义曾连续一百多年对我进行赤裸裸的侵略。铁路曾经被他们用作进行经济掠夺的工具。在本世纪 20 年代之前所建的铁路大桥，诸如在哈尔滨的松花江桥，在济南洛口的黄河老桥，在郑州以北的黄河老桥，那都是由外国人越俎代庖的。而我国南北铁路则是被长江天堑割裂着。为了沟通南北，1933 年在浦口和南京之间建成了一个铁路轮渡。为使华北、华东能够同江南腹地及西南相沟通，亟需在杭州修建钱塘江大桥。这桥是按公路、铁路两用桥设计。上层公路行车道宽仅 6.1 m，下层是单线铁路。正桥 16 孔，都是简支，跨度都是 65.84 m。钢材是铬钢。钱塘江号称“无底”。水中各墩的基础都使用压气沉箱。其中有 9 个基础因为覆盖层厚，在沉箱之下，预先打入长度 30 m 左右的木桩。绝大多数钢梁是用浮运法架设。这是由我们中国人主持并且建成的第一座现代桥梁。施工进度堪称神速。其正式开工是在 1935 年 2 月。1937 年 8 月 13 日，日本侵略者进袭上海；不时派飞机到杭州骚扰，使大桥施工很受影响。但是，这桥还是赶在 1937 年 9 月 26 日就将铁路接通（次月，将公路接通）。当即有几百台火车头和大量装满重要物资的货车、以及客车，从长江以北及华东等地开了过来，经由这桥进入“大后方”（即国民党政府统治地区），对于支援抗日战争起了很大作用。这桥的历史功勋，当永远记载在史册之中。到 12 月 23 日，日本侵略军业已侵犯杭州。这时，为了不使大桥被敌人所利用，这桥的建造者忍痛完成了炸桥准备。最终是在迫不得已时将桥炸毁。（在抗日战争胜利后，这桥当经修复。直到 90 年代，在钱塘江第二桥建成之前，它始终担负着很重的运输任务）

主办我国这一座现代大桥的浙江省钱塘江桥工程处，处长是茅以升，总工程师是罗英。茅以升，字唐臣，1896 年 1 月 9 日生于江苏省镇江市，1989 年 11 月 12 日逝世于北京。他在 1916 年毕业于唐山工业专门学校（唐山交通大学、唐山铁道学院及西南交通大学的前身）。1917 年，在美国康乃尔大学取得硕士学位。论文题目是：两铰上承钢桁架拱桥的设计及其二次应力计算。1919 年 12 月，在美国匹茨堡卡内基理工学院通过了博士论文答辩，获博士学位。论文题目是：杆系结构内的二次应力。在论文中阐述了他所提出的两种独特的二次应力分析方法。随后，Mc Gill 大学的 von Abo 以《桥架的二次应力》为题撰写博士论文。经过公开讨论之后，其论文连同参与讨论者的书而发言，在 Trans. ASCE, v 89, 1926 年发表。这文献将茅所提的方法同 5 位学者所提者并列。这 5 位学者是 Manderla, Winkler, Muller-Breslau, Ritter 和 Mohr。而茅的书面发言讨论也是在这里同时发表。能够在 20 年代就使国际学术

界(尤其是美国)得知中国 20 多岁青年的才华、志气和学术造诣,这确实是给中国人争了光。对于我们这些后继者讲,对茅老的当年成就多知道一些,在激励我们奋发图强方面,肯定地是有益的。

四、从 50 年代以来的发展

在本世纪的前 50 年,发生了两次世界大战。这后 50 年业已过去了 40 多年,小战虽然不少,但却没有发生大战。在这期间,人口大量增加,人口的城市化现象显著,人类活动范围不断扩大。新的产业部门不断涌现,新技术向我们发出挑战,同时也给我们以机遇。

在发达国家之内,干线铁路网早就形成;公路交通空前繁荣,对大城市附近的电车线(含地下铁路)时常需要调整;在各大城市之间,有时需修建高速铁路(日本的各条新干线,就属这一类)。而在发展中国家之内,干线铁路网虽然还未形成,但公路等交通运输方式却已提上日程。发挥不同运输方式的特点和优势,以适应自己所亟需的建设事业,这便是所需解决的课题;而在这一方面,铁路运输始终是十分重要的。

我国是大国,人口多,底子薄。历史昭示我们:只有社会主义能够救中国,也只有社会主义能够发展中国。建设社会主义的中国,必须坚持四项基本原则,必须独立自主、自力更生、安定团结、艰苦奋斗;同时要汲取国内外一切有益的经验,借使建设工作进行得更有效。因此,要先对国外现况作一综述。

1. 当代桥梁的特点及其在铁路钢桥的应用

从 19 世纪后期发展起来的现代桥梁,至今仍然是铁路桥的主流。本世纪 50 年代以来,在公路桥蓬勃发展的情况下,出现了当代桥梁(contemporary bridges)。其特点是:

材料 高强度低合金钢、预应力钢筋、高标号混凝土、聚合物等;

桥梁上部结构 采用正交异性钢桥面板和(混凝土及钢的)结合构造、箱形梁、高度超静定的结构(多跨连续梁或直腿刚架、斜腿刚架、斜拉桥、各种组合体系结构等);

结构设计 可以针对不同情况,按需要引用非线性分析(材料非线性、几何非线性)、空间分析、动力分析、可靠性分析;

施工工艺 用钻孔桩机械(在土层及在岩层)、大直径桩、双壁钢围堰、自升式平台等修建深水基础;用焊接、高强度螺栓、预应力等方式进行连接;用悬臂施工(混凝土灌注及各种预制件的拼装)及整体架设等方法降低造价并压缩工期。

在 50 年代之前,许多桥梁、特别是那些创纪录的长跨桥,往往是在不计工本的情况下造成的。从 50 年代以来,不发生大战既已 40 年,工程结构就必须经济、耐用。而国与国之间的竞争,实质上业已转移到经济和综合国力方面。

当代桥梁之所以多样化,这也是经济竞争的一种表现。到头来,还是要以对各种技术经济指标(省料、省工、省总造价、对环境保护的影响,……)的综合评估来指引发展方向。今先将其在铁路钢桥的应用,举几例如下:

(1) 使用无缝无枕钢桥面板的连续箱形梁桥。联邦德国在 1962 年建成科布伦茨莱茵河双线铁路桥,跨度 $2 \times 113.1 \text{ m}$;上承,箱梁的跨中高度只是 5.03 m 。

(2) 钢斜拉桥。南斯拉夫在 1980 年建成萨瓦河双线铁路桥。道碴桥面。主跨是 253.7 m 。