

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2020.00488

“工程科学与工程创新”专刊

# 工程失败与工程科学：以塔科马海峡大桥事故为例

蔚文杰<sup>1</sup>, 王楠<sup>1</sup>✉, 赵正松<sup>2</sup>

(1. 中国科学院大学 人文学院, 北京 100049;  
2. 交通运输部 科学研究院, 北京 100029)

**摘要:** 由于西方哲学重思辨轻实践的传统, 工程科学和工程知识一直是哲学中“迷失的主题”, 特别是鲜有关于工程知识增长的研究。工程失败是无法避免的, 但它会引发工程科学家对工程科学问题的探索、促进工程科学的发展、推动工程知识的增长。以1940年美国塔科马海峡大桥事故为例, 分析此次事故推动相关的理论工具、定量数据、标准与规范等几种类型工程知识的生长过程, 从而揭示出工程失败对促进工程科学发展和工程知识增长的重要意义和价值。

**关键词:** 工程失败; 工程科学; 工程知识; 塔科马海峡大桥

**中图分类号:** U447; N03      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-4969(2020)05-0488-11

## 引言

在现代工程活动和工程发展中, 工程科学的理论进展状况往往是成为工程演化发展和产业发展的关键环节<sup>[1]</sup>。然而由于西方哲学重思辨轻实践的传统, 知识论和科学哲学对科学知识进行了大量的深入分析和研究, 而对工程知识的研究还比较薄弱<sup>[2]</sup>。史都丹麦尔(John M. Staudenmaier)曾对在西方技术史研究领域颇具影响力的杂志《技术与文化》20世纪60年代至80年代发表过的文章进行分析后, 满怀信心地宣称“工程知识<sup>①</sup>要成为《技术与文化》的一个新主题”<sup>[3]</sup>。但是, 后来的发展态势却让人大失所望。霍克斯(Wybo Houkes)指出, 文森蒂(W. Vincenti)的《工程师知道什么以及他们是如何知道的》一书出版后, “关于工程知识<sup>①</sup>的本质的研究似乎已陷入了停滞状态”<sup>[3]</sup>。21世纪工程哲学在中西方同

时兴起后, 殷瑞钰等学者明确提出这种状况亟需改变, “在工程哲学中, 对工程知识的哲学研究是一个重大问题”<sup>[4]</sup>。

尽管文森蒂是工程师出身, 但在本书中却对工程知识做了详细的认识论分析, 以至于技术史学家弗洛曼(Samuel Florman)在书评中抱怨道: “他对认识论细节的过分关注, 是以关注人员和组织问题为代价的。”<sup>[3]309</sup> 文森蒂的研究是具有里程碑意义的: 他根据20世纪上半叶航空工程的发展, 分析了工程知识的特征、类型和结构。在此基础上, 他还提出了工程知识增长的“变异-选择”模型, 对比了工程知识与科学知识的生长机制的差异。

在工程活动中, 任何一个工程项目、任何一名工程人员都不希望出现失误或者错误, 即出现工程失败, 因为这会酿成事故、造成人员伤亡、

原文是 technological knowledge, 但根据上下文, 本文认为翻译成“工程知识”更合适。

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-09-04

作者简介: 蔚文杰(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程哲学。E-mail: yuwenjie171@mails.ucas.ac.cn

✉王楠(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为工程哲学、工程社会学。E-mail: wangnan@ucas.ac.cn (通讯作者)

赵正松(1977-), 男, 双硕士学历, 高级工程师, 研究方向为交通工程经济与管理。E-mail: zhaozheng-song@tsinghua.org.cn

带来经济损失。因此,避免工程失败是工程的首要问题。然而,所有的工程活动都是基于有限信息所做出的预测和推断,不可能囊括现实环境所涉及的各种影响因素,因此工程失败又是无法避免的。

工程失败分为原发性工程失败与继发性工程失败,对于原发性工程故障,要认真分析其成因,从中获取有用的工程知识。对于继发性工程故障,要避免因误操作而导致相同原因故障的发生。对于后者应当避免,有可能、有能力避免。而对于前者,非但不能避免,而且还是人类工程知识的来源<sup>[5]</sup>。因此,工程失败的发生不仅会给人们带来损失和痛苦,它也会增进人们对工程的认识、促进工程知识的增长。

美国工程师波卓斯基以擅长分析工程中的失败案例而闻名,关于这一主题出版了 10 多本专著。在他看来,“每一次的失败都显示了我们在相关领域的无知,给出了一组又一组的崭新数据供人们做进一步的研究。这些数据能够帮助我们找出事故发生的原因,同时也使我们有机会更进一步追溯设计、制作或使用环节中出现的差错。”<sup>[6]</sup>在这个意义上,格里姆森(William Grimson)认为:“反例或失败在工程中具有重要意义,虽然它不是科学的鲜明特征。”<sup>[7]</sup>鉴于工程失败的重要意义和价值,波卓斯基甚至认为,“工程设计的本质就是对失败的改善”,“失败的概念是理解设计的核心,因为工程设计最首要的目标就是避免失败。所以,那些确实发生过的巨大灾难是设计的终极失败。但是从这些灾难中吸取的教训,比世界上所有成功的机械和设备,在提高设计认识方面都能够起到更大的作用。”<sup>[8]</sup>

然而,文森蒂“一直把注意力集中在当设计者缺少所需要的知识时新知识的生成这样的焦点上”<sup>[9]</sup><sup>307</sup>,即工程知识增长的一般性问题,并没有特别关注工程失败对工程知识增长的促进作用。波卓斯基等一些学者认识到工程失败的重要

价值,但他们尚未结合具体案例来分析工程失败如何促进工程知识的增长。

因此,本文选取了 1940 年塔科马海峡大桥(Tacoma Narrows Bridge,以下简称塔科马大桥)事故来探讨工程失败如何促进工程科学的发展。塔科马大桥在低风速下发生了风毁事故,让工程科学家认识到风动力对桥梁结构的重要影响,“开启了全面研究大跨度桥梁风致振动和气动弹性理论的序幕”<sup>[10]</sup><sup>20-26</sup>,对桥梁工程知识领域产生了重大而深远的影响。20 世纪 40 年代空气动力学家西奥多·冯·卡门(Theodore von Kármán)等人对桥梁模型进行风洞试验的方法,如今已成为桥梁结构抗风研究的最普遍、最重要的途径和技术手段。20 世纪 60 年代桥梁抗风理论研究兴起和发展,艾伦·达文波特(Alan Davenport)提出采用统计数学的方法来进行风工程研究,解决了随机抖振问题,并将风效应表示成等效风荷载形式,罗伯特·斯坎兰(Robert Scanlan)建立了桥梁颤振理论和考虑颤振作用力的颤抖振理论。20 世纪 90 年代计算流体力学又有了显著进步,目前已能解决均匀流、简单形体、低雷诺数下的数值模拟计算问题<sup>[10]</sup>。直到今天,事故中的一些问题仍然是桥梁工程科学的重要研究主题<sup>[11]</sup><sup>xi, xxi</sup>。

## 1 工程失败和工程知识的相关概念及案例回顾

### 1.1 工程失败和工程知识的相关概念

要理解“工程失败”这一术语的涵义,有必要先考察一下“失败”一词与失效、故障、事故、灾难等概念的联系与区别。

《现代汉语词典》中,“失败”指的是(人的行为)没有达到预期的目的<sup>[12]</sup><sup>1076</sup>。因此,波卓斯基将“工程失败”定义为工程中的工艺(装置)技术不能按规定运行或不能满足人们的期望或设想的状态<sup>[13]</sup>。

在《中华人民共和国国家标准——可靠性、

维修性术语》中,“失效”一词指的是产品终止完成规定功能的能力这样的事件。“故障”指的是产品不能执行规定功能的状态<sup>[14]</sup>。

根据《现代汉语词典》,“事故”指的是意外的损失或灾祸(多指在生产、工作上发生的)。“灾难”指的是天灾人祸所造成的严重损害和痛苦<sup>[12]1449</sup>。

可以看出,失效、故障、事故、灾害都是没有达到预期的目的行为或事件,并出现了人们不希望的结果。因此,本文认为工程中的失效、故障、事故、灾难都属于工程失败。

工程知识数量大、内容丰富,在研究它的增长问题时,必然会涉及分类问题。霍克斯认为,工程知识的分类标准有两个显而易见的来源:一是工程科学不同学科的传统分类标准,如机械工程、化学工程、生物医学工程的分类群,二是以某个领域所生产的人工物为基础进行分类,如软件工程、海事工程。在他看来,“这两种分类方法在认识论上似乎是无益的,第一种方法甚至有可能将那些致力于将工程知识从科学知识中‘解放’出来的人引入歧途。”<sup>[3]321</sup>也就是说,遵循已有的科学和工程科学的分类标准,会延续“工程是应用科学”的错误看法,无法揭示工程知识的独特性,因此,现有的工程知识的分类方法“不是从工程领域与科学之间的现有差别出发……而是打破了学科和领域之间的界线”。<sup>[3]321</sup>他还总结了文森蒂、罗波尔、德弗里斯、福克纳、汉森等西方学者的工程知识分类标准。

在这些分类标准中,文森蒂的分类方式具有鲜明的特点。文森蒂十分重视工程中的“设计”环节,他说“本书对设计的重视并不意味着工程的其他研究领域就不值得关注。作为一个完整的工程认识论,生产和运营也需要得到同样的关注。然而,目前我将工作主要限于工程设计知识。”<sup>[9]5</sup>因此,他将工程知识划分为设计的基本概念、理论工具、量化数据、标准与规范、实践考虑、设计手段六种类型。值得注意的是,文森蒂的“这

种分类与其内容在专业领域中并不常见”,除了实践考虑和设计手段是他自己创造的术语外,其他四个术语都是“工程师所使用的”<sup>[9]268</sup>。这种分类方法符合工程实践的具体情况、便于从认识论的视角考察具体案例,因此,本文将按照文森蒂的工程知识分类方法来分析塔科马大桥事故。

## 1.2 塔科马大桥案例简要回顾

塔科马大桥位于美国华盛顿州普吉特海峡,1940年7月1日建成通车,是当时仅次于金门大桥和乔治·华盛顿大桥的世界第三大悬索桥。然而,这座著名的大桥通车仅四个月就被风摧毁。幸运的是,这次事故没有造成人员伤亡,而且大桥垮塌的过程恰巧也被摄影机完整记录下来,为后续调查事故原因奠定了基础。

事故发生后,由当时著名的桥梁工程师奥瑟马·安曼(Othmar H. Ammann)、跨湾设计工程师格伦·伍德拉夫(Glenn B. Woodruff)和空气动力学家西奥多·冯·卡门(Theodore von Kármán)组成工程师委员会(Board of Engineers)负责调查这起事故的原因。这起事故最令人不解之处是,按照塔科马大桥的设计方案,它可以承受161千米/小时风速、146千克/平方米静态水平风压,但它竟会在不到设计极限的一半风速、约六分之一静态水平风压的情况下垮塌。

经过调查后,工程师委员会一致认为:“在大桥核心跨径桥面最终垮塌前的一个小时,大桥的整体结构和各个主要组成部分都经历了严峻的考验。在此期间,在剧烈的晃动下,桥面的主要组成部分如吊杆、缆索和塔架等承受的应力远远超过这些部分设计时的安全应力,而且在很多时候其所承受的应力会导致这些部分发生故障。在极大应力的作用下,大桥的主要承载构件、尤其是塔架,实际上并没有发生故障,这足以证明它们的出色设计、优质材料质量和精湛工艺,如果不出现如此剧烈的晃动,大桥的结构具有充分的安全限度。”<sup>[15]37</sup>也就是说,大桥的结构设计符合科

学理论的要求,所采用的材料质量和建造工艺都没有问题,但是大桥自身却出现了始料未及的剧烈振荡,这是什么原因导致的呢?

### 1.3 工程失败原因排查——从静态不稳定到动态不稳定

在塔科马大桥事故之前,桥梁工程师在悬索桥的设计中,通常只考虑静态力对大桥的影响,而没有意识到动态力会对大桥产生的作用。甚至在塔科马大桥垮塌后,美国著名土木工程师斯坦曼(David B. Steinman)——曾经设计了麦基诺悬索桥以及多座悬索桥的知名工程师,依然否认塔科马大桥是受动态力的影响而导致垮塌。他在1943年发表的文章中指出,塔科马大桥应当是受到静态不稳定力的影响,而不是动态不稳定力。他解释说:“向上吹的风会在前缘大梁的下方和后方产生一个吸力或‘负压’区域。这种现象与伯努利原理有关。在伯努利原理中,速度越快,压力越小。桥梁周围分布的风力并不均匀;更多的气流在下面流动,从而导致更高的风速、更低的气压和向下的力。在较深的大梁后面,吸力会延伸到足够的横截面上,产生主导的向下力,从而产生垂直不稳定……在不稳定的柔性梁中,会发生负阻尼,因为扭转轴线将超出甲板中心线,产生不平衡的、自放大的扭转。”<sup>[16]</sup>因此,斯坦曼当时认为,这次事故的原因主要是板梁设计柔性太大,而不是动态不稳定力的影响。

1967年,冯·卡门在他的自传中回忆道:“我没想到桥梁工程师的偏见会如此根深蒂固、持续这么久。他们的思想很大程度上受制于静态力的影响,比如他们只考虑不会产生(大桥)晃动的重量和压力,而不考虑产生晃动或者晃动变化的动态风力……桥梁工程师们虽然很优秀,却看不到一门应用于飞机机翼之类不固定小东西的科学,也可以应用于像桥梁这样的巨大、坚固、固定的结构上。”<sup>[17]</sup>因此,在事故调查报告中,工程师委员会认为,没有人应当为此次事故负责,桥

梁工程师应当通过进一步的实验和分析来研究空气动力对悬索桥的影响<sup>[15]</sup>。

后来,斯坦曼的思想慢慢发生了转变,他也开始研究桥梁空气动力学。他在1957年的文章中写道:“塔科马大桥的失败不能怪他(设计师),整个行业都有责任。很简单,该行业忽视了将空气动力学和动态振动知识与迅速发展的结构设计知识结合起来并及时加以应用。”<sup>[11]69</sup>

塔科马大桥事故开启了工程科学中的桥梁空气动力学研究,逐步提出了新的理论工具、量化数据、标准与规范,促进了桥梁工程知识的增长。

## 2 工程失败与新理论工具的产生

理论工具的完备与否对于一项工程的成败来说至关重要。一般认为,理论工具包括两类,一类是数学方法和进行设计计算的理论,另一类是用于设计的智力概念。其中,数学方法和进行设计计算的理论指的是具有数学结构的理论知识体,也就是通常所说的“工程科学”。智力概念是指进行设计和分析之前存在于人们心智中的概念。智力概念类型广泛而多样,从高度科学化的概念延伸到极为实用的概念,从具体的数学概念延伸到明确的物理概念<sup>[9]273-276</sup>。当工程失败出现时,首先应当检验其应用的理论工具是否可以解释工程失败的发生,如果不能,则需要改进现有的理论工具以获得对失败的进一步认知。塔科马大桥事故是一起由于理论工具的不完备而导致失败的典型案例。事故发生后,桥梁工程师很快发现了大桥设计所依据的理论方面的缺陷,并展开了长达几十年的理论探索与创新,甚至直至今日,依然有学者对此继续研究。

### 2.1 塔科马大桥设计之初的理论工具

塔科马大桥设计之初所依据的理论工具主要是挠度理论,是奥地利工程师约瑟夫·梅兰(Josef Melan)提出的。事实上,挠度理论正确地解释了静态风力对悬索桥结构产生的水平推力而使其发生

水平位移, 以及抵抗该推力需要的缆索刚度<sup>[11]31-32</sup>。

美国 20 世纪二、三十年代悬索桥的领军人物莱昂·莫伊塞夫 (Leon Moisseiff) 进一步发展了挠度理论并将其付诸实践。1909 年, 莫伊塞夫首次把挠度理论应用到曼哈顿大桥的设计中并取得了成功。经过几十年发展, 挠度理论逐步成熟并被应用到乔治·华盛顿大桥的设计中。1931 年, 乔治·华盛顿大桥建成通车, 其主跨度几乎是之前悬索桥的两倍。这开启了美国基于挠度理论的悬索桥梁设计和修建的黄金十年, 共建造了七座跨度为 305 米 (1000 英尺) 以上的悬索桥<sup>[18]</sup>。由于这些大桥本身足够的宽度和重量, 使得这些大桥没有受到动态风力的破坏, 因此桥梁空气动力长期以来并未引起工程师的关注。

从此莫伊塞夫声名鹊起, 他几乎参与了 20 世纪二、三十年代所有大型悬索桥的设计, 并完成了塔科马大桥的设计方案。然而, 这次设计方案却让他的职业生涯走到了尽头。事故发生后, 他回忆说: “每座大桥在建造过程中都会遇到新的情况, 塔科马大桥在工程史上是独一无二的, 因为出现了一个没有预料到、也无法预料到的新情况”, “空气动力稳定性还是一个相对未知的主题。”<sup>[19]</sup>

## 2.2 对工程失败的调查与新理论工具的产生

塔科马大桥事故发生后, 由于当时的理论工具无法解释事故中出现的垂直振荡与扭转振荡现象, 工程师们必须努力探索新的理论工具, 从而逐步促进了垂直振荡理论、扭转振荡理论、垂直振荡转变为扭转振荡理论、横向振荡理论的发展<sup>[20]</sup>。

### 2.2.1 垂直振荡理论的发展

工程师委员会的事故调查报告中, 采用解析方法研究了塔科马大桥的垂直振荡的特性。但是他们的理论没有考虑到由于惯性力引起的缆索弹性拉伸。1943 年, 工程师斯坦曼独立地用相同的方式分析了桥梁垂直振荡的机理, 但也没有考虑

惯性力对大桥缆索的影响。1950 年, 布莱奇 (Friedrich Bleich) 发表了专著《悬索桥振动的数学理论》, 认识到了惯性力引起缆绳弹性拉伸从而对悬索桥垂直振荡的影响<sup>[21]</sup>。至此, 悬索桥垂直振荡的分析理论基本形成。

### 2.2.2 扭转振荡理论的发展

1941 年, 加州理工学院古根海姆航空实验室的工程师瑞奈 (William Duncan Rannie) 提出了悬索桥扭转振荡的理论分析方法<sup>[22]</sup>。但是他的理论没能考虑具有闭合型断面的悬索桥, 因此并不适用于全部的悬索桥。史密斯 (Frederick C. Smith) 和文森特 (George S. Vincent) 发展了瑞奈的扭转振荡理论, 考虑了惯性力对桥梁正对称振荡的影响, 但仍然未考虑加劲梁的扭转刚度<sup>[23]</sup>。布莱奇在 1950 年发表的著作中, 提出加劲梁扭转振荡的解析理论, 不仅考虑了惯性力对悬索桥缆索的影响, 还考虑了加劲梁的扭转刚度和挠曲变形的影响。可以说, 布莱奇的研究奠定了悬索桥领域垂直振荡与扭转振荡分析的理论基础。1959 年, 斯坦曼区分了需要考虑和不需要考虑加劲梁扭转刚度的两种情况, 进一步完善了悬索桥扭转振荡分析理论。

### 2.2.3 垂直振荡转变为扭转振荡的理论分析

塔科马大桥是如何从垂直振荡转变为扭转振荡呢? 冯·卡门认为, 卡门涡街是塔科马大桥垂直振荡变为扭转振荡的原因。在他看来随着风力的加大, 垂直振荡会引起扭转振荡<sup>[24]</sup>。2003 年, 松本清 (Masaru Matsumoto) 等学者的研究指出, 涡旋引起的垂直振动和扭转振动之间存在空气动力学干扰。这些干扰不仅具有稳定作用, 而且具有不稳定作用。垂直振荡涡旋会引起扭转振荡, 塔科马大桥事故可以用空气动力学干扰来解释<sup>[25]</sup>。然而, 普兰特 (Raymond H. Plaut) 在 2008 年提出, 从垂直振荡到扭转振荡的转变不是由于风速的增加。此外, 这不是由于非线性系统从一个极限周期切换到另一个极限周期, 而是桥梁系统由于缆绳的局部断裂而彻底改变导致的, 并且北中

跨电缆的摩擦阻力局部减小而导致桥面出现扭转振荡<sup>[26]</sup>。

### 2.2.4 横向振荡理论的发展

1957年,西尔弗曼(Isadora K. Silverman)针对塔科马大桥事故中出现的横向振荡提出了数学分析理论,但是他没有考虑缆绳和加劲梁的相互作用。一年后,塞尔伯格(Arne Selberg)在西尔弗曼研究的基础上,考虑了缆索和加劲梁相互作用对悬索桥横向振动的影响,进一步完善了西尔弗曼的研究。1986年,卡斯特拉尼和费洛迪(Alberto Castellani & Pierangelo Felotti)通过仔细分析,认为塞尔伯格的研究比较精确,无需再进行修正<sup>[27]</sup>。

## 3 工程失败与量化数据的拓展

量化数据是指工程中展示工程设计的详细布局或详细说明生产的制造工艺的数值,可以通过计算或经验获得,分为规定性数据和描述性数据。规定性数据是为实现预定目标应当怎么做的知识,即“为了实现这一目标,这样来安排事情”,如工艺流程规范、行业标准、安全系数等。描述性数据是关于事物是如何的知识,既包括物理常量(如重力加速度)、物质性质(材料的破坏强度、液体黏性系数等)和物理过程性质(化学反应率等)又包括物理世界中的工作条件以及关于人的信息或者事物性能的全面测量结果<sup>[9]276-277</sup>。

当工程失败发生时,人们会对失败工程中使用的设计数据的有效性提出质疑,如果是数据参数的合理性区间出现问题,工程师会进行理论和实践验证,对已有的数据进行修正或者拓展尚未进行规定的的数据阈值。在塔科马大桥事故中,“刚度系数”的出现很好地体现了工程失败对工程定量数据知识增长的影响。

### 3.1 事故发生前悬索桥设计刚度的确定

刚度是指材料或结构在外力作用下抵抗弹性形变的能力,桥梁的刚度由建造桥梁的材料和桥

梁的结构共同决定。由于悬索桥的结构由悬索和桥面两部分组成,悬索桥的桥梁刚度必然要考虑这两部分的受力情况。1883年,工程师罗布林(John Augustus Roebling)建成了世界上第一座较大跨度的现代悬索桥——纽约布鲁克林大桥。由于当时没有理论可以计算大桥悬索部分的受力情况,工程师罗布林只能依靠多年的职业直觉对桥梁的弯曲和张力做出简单的假设<sup>[11]83</sup>。为了使大桥获得足够的刚度,罗布林特别强调桥梁自重的重要性<sup>[28]</sup>。因此,在现代大跨度悬索桥建设初期,工程师普遍采用深梁桁架和宽桥梁来增加悬索桥的重量进而使之获得足够的刚度。

1888年,梅兰提出的弹性理论假设抛物线形的主缆不发生缆索偏转,在恒载的作用下,活荷载在桥梁主跨中均匀分布。与之前的理论相比,弹性理论考虑了在荷载均匀分布的情况下,受拉主缆的弹性刚度和弯曲力对悬索桥刚度的影响。但是,弹性理论高估了活荷载和温度效应对桁架的弯矩和剪切力,因此,它导致桥梁设计中会增加不必要的深梁桁架,特别是在长跨度悬索桥设计中,这个缺点尤为明显。

到了20世纪,莫伊塞夫的挠度理论为解决这个问题做出了一定贡献。与弹性理论相比,挠度理论考虑了悬索结构的挠度在桥梁活荷载情况下的实际变化,可以较为精确地计算主缆的重力刚度对大桥刚度的影响。因此挠度理论提出,桥梁的甲板、主缆和吊索(“自重”元件)的重量提供了足够的结构刚度以抵抗风荷载和活荷载的影响,不需要深梁桁架来增强桥梁刚度<sup>[29]</sup>。莫伊塞夫的挠度理论被大量应用于悬索桥设计,塔科马大桥也不例外。这座大桥被设计得细长而优美,既节省钢材降低了成本,又符合当时悬索桥设计的发展趋势。

然而,人们不禁会产生疑问,那些比塔科马大桥修建的早、同样应用挠度理论设计的金门大桥、乔治·华盛顿大桥等悬索桥,为什么没有出

现事故呢? 工程师委员会在事故调查报告中认为, “这些大桥的加劲桁架的刚性和桥面的宽度增加了桥身的重量, 使得它们能够经受较大风力的影响。”<sup>[15]94</sup> 由于挠度理论强调主缆的重力刚度, 特别是当大桥跨度变长之后, 主缆重力刚度对大桥刚度的贡献会被高估, 再加上当时的悬索桥工程师忽略了加劲梁本身的风动效应, 使得塔科马大桥加劲梁断面抗风稳定性差, 同时桥面宽度较窄导致桥身的刚度不足, 结果大桥在 19 米/秒的中等风速下扭曲断裂<sup>[30]</sup>。

### 3.2 工程失败与桥梁刚度系数的产生

1942 年 5 月, 为了进一步研究塔科马大桥事故发生的原因, 美国公路管理局 (Public Roads Administration) 在美国土木工程师协会 ASCE (The American Society of Civil Engineers) 等组织的敦促下, 组织法夸森、冯·卡门、伍德拉夫等知名学者成立了悬索桥调查咨询委员会 (Advisory Board of the Investigation of Suspension Bridges)。该委员会于 1949 年至 1954 年期间发表了多份研究报告。这些报告通过仔细分析塔科马大桥和塔科马新桥的气动性能, 认为桥梁的宽跨比与桁架深跨比是影响大桥振动敏感性的重要因素<sup>[11]79-80</sup>。

为了在大桥刚度设计时避免桥梁风动态失稳现象, 工程师们提出了“刚度指数”概念, 基于空气动力特性与现有桥梁的设计特点的关系的实证评估, 预测新设计中的潜在振荡风险。其中, 斯坦曼设计的“刚度指数”涉及了桥面长度、宽度、桥的重量、风速和桥梁深度等参数。斯坦曼认为, 塔科马大桥事故的原因主要在于桥梁结构设计的极端灵活性<sup>[31]</sup>, 为了抑制这种灵活性, 必须对桥梁的长跨比、宽跨比等一系列数据进行限制。根据他的“刚度指数”, 他建议 305 米到 610 米跨度的悬索桥, 桥梁深度与跨度之比不能低于 1:100, 超过 1220 米跨度, 深度与跨度之比为 1:80<sup>[11]84</sup>。安曼等人也独立地提出自己的“刚度系数”。如今, 美国国家高速公路和交通运输协会

对桥梁的刚度指数进行了更为严格的规定<sup>[32]2-14</sup>。

## 4 工程失败与标准、规范的完善

标准与规范是指为了实现设备的具体目标而设置的关于设备具体要求的知识, 即设计师或其他人必须把装置的一般定性目标用具体技术术语表达的特定的量化指标, 例如, 在河上建桥的迫切需要必须转化成跨度和载重的具体要求。标准与规范常常表现为图表和尺寸规格等数值或范围的形式, 在行业内具有普遍适用性, 在涉及一般效用或安全问题时, 会受到政府或法律的约束<sup>[9]271-273</sup>。标准与规范的制定, 需要利用理论工具、数据和实践判断等其他种类的工程知识, 同时, 标准与规范也可能产生于工程师在对理论工具或数据探索的过程中。

塔科马大桥并不是所谓的豆腐渣工程, 它的设计和建造完全符合当时悬索桥的设计标准和规范。工程师委员会的事故调查报告指出: “塔科马大桥设计和建造得很好, 能够安全抵抗类似结构通常需要考虑到的、包括风在内的所有静态力。”负责大桥施工期间监管工作的美国公共工程管理局和复兴银行公司也认为大桥“设计的充分性不可能存在任何问题”。因此, 塔科马大桥没有违当时悬索桥的设计标准和规范。然而, 该报告也明确指出“(悬索桥设计领域)通常考虑的抵抗静刚度的标准不一定适用于动态力。”<sup>[15]</sup>也就是说, 当时悬索桥领域的标准与规范存在一定的问题, 这才是导致事故的重要原因。

### 4.1 工程失败与风洞测试标准与规范的确定

风洞试验作为一种模拟工程实物与空气气流相互作用的实验方法, 最初被应用于航空航天领域, 如今已经广泛应用于桥梁设计领域, 是大跨径和特大跨径桥梁设计中的关键环节之一, 为桥梁抗风设计理论和规范的改进提供最直接有效的依据。风洞试验能够得以在桥梁设计领域大显身手, 塔科马大桥事故起到了不可忽视的推动作用。

在塔科马大桥设计和修建的时代,由于动态力对桥梁的影响一直未能得到应有的重视,风洞试验对桥梁界人士来说还是一个很陌生的概念。1940年7月,塔科马大桥建成通车后,人们发现这座大桥在微风中出现了垂直振荡现象。为了研究这个现象并采取适当的应对措施,法夸森教授开始着手对其进行研究<sup>[33]</sup>,他采用的研究方法正是风洞试验,因此他也成为第一位用风洞试验来研究塔科马大桥的人。然而令人惋惜的是,法夸森教授的建议还没来得及被政府付诸实施,塔科马大桥就发生了垮塌事故。

空气动力学专家冯·卡门是塔科马大桥调查工程师委员会和悬索桥调查咨询委员会的重要成员之一,他在加州理工学院古根海姆航空实验室曾对大桥模型进行过风洞测试。因此,他主张工程师委员会和调查咨询委员会用风洞试验的方法调查塔科马大桥事故。工程师委员会用风洞试验来模拟塔科马大桥的振荡现象,于1941年3月发表了塔科马大桥事故的调查报告<sup>[15]</sup>。悬索桥调查咨询委员会则提出,为了准确研究悬索桥的气动特性,为塔科马新桥和以后新建的悬索桥提供准确的数据,应当建造一个专门用于桥梁研究的大型风洞。调查咨询委员会与法夸森所在的华盛顿大学合作,在1942年上半年由法夸森指导,专门建造了一个12米深、40米长的大型风洞,为咨询委员会的研究提供了设备支持。当年夏天,华盛顿大学力学与工程专业的学生建立了一个1:50比例尺、30.5米长的塔科马大桥钢模型,法夸森于同年11月开始,经过为期三个月的风洞试验,他模拟了塔科马大桥原始跨度的所有特性,包括导致垮塌的扭转振荡<sup>[11]78</sup>。

1950年,塔科马新桥的设计者使用风洞试验来测试桥梁设计的稳定性及结构风动力效应,这是北美洲第一座运用风洞试验设计/建造的大桥<sup>[34]</sup>。从此之后,风洞试验成为悬索桥领域必须遵循的设计规范<sup>[35]</sup>。

## 4.2 关于悬索桥大梁标准形式的争论

在塔科马大桥的设计中,莫伊塞夫打破了传统的做法——使用了板梁而不是传统的桁架——作为悬索桥的大梁。因此,塔科马大桥垮塌后,当时的很多工程师在悬索桥设计中反对使用板梁。例如,法夸森在1946年8月出版的《土木工程》一书中将“板梁”贬得一文不值,他发现板梁悬索结构中的甲板开口几乎没有增加任何价值,一些开口形式甚至会助长振荡,而桁架顶部的露天甲板则会提高大桥的稳定性<sup>[11]85</sup>。

然而,反对使用板梁的观点遭到了很多工程师的反驳。在斯坦曼看来,法夸森的观点是“对板梁夸大了的控诉”,他认为:“用桁架代替板梁不会产生神奇的空气动力学价值……桁架的优势在于它们通常具有更大的深度、刚度和结构阻尼,而不是任何神秘的空气动力学优势……具有同等灵活性和低阻尼的桁架截面,在空气动力学意义上同样容易受损。”<sup>[11]85</sup>默克(Elizabeth B. Mock)在《桥梁建筑》一书中指出,从建筑和美学的角度来看,“尽管桁架是对悬索桥过度灵活性的显而易见的、正统的纠正办法,但是恐惧的工程师和政府官员在悬索桥设计上匆忙地退缩到看起来安全、但又厚又笨拙的桁架,这个快速反应是不适当的。”<sup>[36]</sup>

实际上,桁架桥不一定比板梁桥坚固。工程师莫杰斯基(Ralph Modjeski)和马斯特斯(Frank Masters)认为,“板梁不应当被拒绝使用,刚度不足并不是只有板梁结构”,“罗布林设计的桁架结构的金门大桥比最近的板梁悬索桥的刚度要小一些,金门大桥的桁架也不能免受简谐振动的影响。”因此,“轻率地放弃板梁的使用将被证明是不符合现代工程和设计的,当然有必要暂时不使用板梁,直到一般性问题得到解决。”<sup>[37]</sup>

经过研究,工程师们提出了改进板梁结构的建议:应当关注甲板——桥梁结构的组成部件之一——的气动外形而不是它的深度。1943年8月,美国波特兰水泥协会的哈德利(Homer M. Hardly)在写给《工程新闻记录》(Engineering News-

Record) 的信中提出了“在当时看来颇具前瞻性的观点”。他在信中写道：“风是如何绕着或者穿过甲板结构的，以及它所施加的力是什么，这些真正是问题的实质，”他根据法夸森一年前在塔科马大桥模型使用半圆整流罩的做法，进一步指出：“目前来看，还不成熟的浅流线型甲板很有可能具有稳定性……从恰当的甲板的气动外形来看，塔科马大桥的深跨比甚至可能是十分保守的。”<sup>[38]</sup>

尽管法夸森反对使用板梁，但是他的风洞试验证实了甲板的气动形式是改进板梁结构、提升大桥稳定性的关键。在法夸森研究的基础上，斯坎兰于 1969 年在《悬索桥甲板颤振失稳研究》(Studies of Suspension Bridge Deck Flutter Instability) 报告中，进一步探讨了悬索桥甲板气动形式的相关问题<sup>[39]</sup>。如今，悬索桥大梁的标准形式不仅是桁架梁，还可以是板梁梁、板桁拼接梁。

## 5 结语

工程知识一直是哲学中“迷失的主题”，特别是关于工程知识增长的研究还十分薄弱。工程失败虽然是无法避免的，会给人们带来损失和痛苦，但它也会增进人们对工程的认识、促进工程知识的增长、推动工程科学的发展。文森蒂在《工程师知道什么以及他们是如何知道的》一书中探讨了工程知识增长的一般性问题，但没有特别关注工程失败对工程知识增长的促进作用。波卓斯基等一些学者认识到工程失败的重要价值，但他们尚未结合具体案例来分析工程失败如何促进工程知识的增长。本文以 1940 年美国塔科马海峡大桥事故为例，分析此次事故推动相关的理论工具、定量数据、标准与规范等几种类型工程知识的增长过程。

在塔科马海峡大桥的案例中，由于当时的桥梁工程师在悬索桥的设计中，通常只考虑静态力对大桥的影响，而没有意识到动态力会对大桥产生的作用，导致 20 世纪 40 年代悬索桥领域中风动力对大桥影响的理论工具不完备、定量数据缺

失、相关标准与规范不健全。塔科马海峡大桥事故的发生，揭示出当时悬索桥工程知识中存在的这些问题，工程师围绕着这些问题展开探索与创新，从而推动了 this 领域工程知识的增长。

塔科马大桥的案例充分说明：工程失败对工程知识的增长具有十分重要的意义和价值，它是工程知识增长和工程科学发展的重要途径之一，“只有故障才是工程师第一可及的事物，也只有有了故障信息才会有可靠性定量值和由此而来的一系列指标、理论和方法。”<sup>[40]</sup>因此，“工程事故是工程知识的一个重要来源，从工程事故中探索新知识，也是工程学习的重要方式之一。”<sup>[41]</sup>为了获得更多的工程知识、更好地促进工程科学的发展，波卓斯基认为“对于工程师来说，研究事故的案例就不能少于对成功案例的研究。”<sup>[8]100-101</sup>然而，正如李伯聪教授指出的，“在工程案例研究和工程史研究方面‘研究空白’太多，‘未开垦的处女地’太多，以至于这种‘工程史基础薄弱’的情况已经成为我们开展工程哲学研究的一个严重障碍了。”<sup>[42]</sup>尤其是在我国，由于传统文化“报喜不报忧”思想的深远影响，工程失败一直是一个谈之色变、讳莫如深的话题，对工程失败的案例研究更是长期受到忽视，这对于我国的工程科学发展是十分不利的。

## 参考文献

- [1] 殷瑞钰, 傅志寰, 李伯聪. 从“两类物质世界”出发看工程知识——工程知识论研究之一[J]. 自然辩证法研究, 2018.
- [2] 李伯聪. 工程知识论的艰难出场与“知识论 2”的展望[J]. 哲学分析, 2020, 3: 146-162, 198.
- [3] Houkes W. The Nature of Technological Knowledge[C]// Anthonie Meijers (ed.). Philosophy of Technology and Engineering Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [4] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪. 工程哲学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 145.
- [5] 王佩琼. 认知视野下的工程故障[J]. 自然辩证法研究, 2011, 27(4): 74-80.
- [6] 亨利·波卓斯基. 请原谅设计[M]. 李孝媛, 译. 浙江: 浙江大学出版社, 2018: 42.

- [7] Grimson W. Engineering: An Inherently Philosophical Enterprise[M]. Steen Hyldgaard Christensen, Martin Me-ganck, and Bernard Delahousse (eds.). Philosophy in En-gineering. 2007: 89-102.
- [8] 亨利·波卓斯基. 设计, 人类的本性[M]. 王芊, 马晓飞, 丁岩, 译. 北京: 中信出版社, 2012: VI, X.
- [9] 沃尔特·G. 文森蒂. 工程师知道什么以及他们是如何知道的[M]. 周燕, 闫坤如, 彭纪南 译. 浙江: 浙江大学出版社, 2015: 307.
- [10] 项海帆, 肖汝诚. 第十八届全国桥梁学术会议论文集(上册): 现代桥梁工程六十年[C]. 北京: 人民交通出版社, 2008, 20-26.
- [11] Scott R. In the Wake of Tacoma[M]. Virginia: ASCE Press, 2001.
- [12] 郑钢. 新世纪汉语词语工具书: 现代汉语词典[M]. 第一版. 内蒙古: 内蒙古人民出版社, 2004.
- [13] Petroski H. Success Through Failure: The Paradox of De-sign[M]. Princeton: Princeton University Press, 2013: 1-7.
- [14] 机械电子工业部电子标准化研究所. GB 3187-94 中华人民共和国家标准——可靠性、维修性术语[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 1995: 2-3.
- [15] Ammann O H, Karman T V, Woodruff G B. The Failure of the Tacoma Narrows Bridge[R]. Washington: Federal Works Agency, 1941: 37.
- [16] Steinman D B. Rigidity and Aerodynamic Stability of Suspension Bridges[J]. Proceedings American Society of Civil Engineers, 1943, 69(12): 1361-1397.
- [17] 冯·卡门, 李·爱特生. 钱学森的导师——冯·卡门传[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 219.
- [18] Buonopane S G, Billington D P. Theory and History of Suspension Bridge Design from 1823 to 1940[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (3): 954-977.
- [19] Anonymity. Span Model Withstood Gale, Says Bewildered Designer[N]. Seattle Times, 1940-11-14.
- [20] 陈仁福. 大跨悬索桥理论[M]. 西南交通大学出版社, 2015: 67-69.
- [21] Bleich F M, McCullough C B, et al. The Mathematical Theory of Vibration in Suspension Bridges[M]. Govern-ment Printing Office: Washington, 1950.
- [22] Rannie W D. The Failure of The Tacoma Narrows Bridge[R]. Washington: Board of Engineers, 1941.
- [23] Smith E C, Vincent G S. Aerodynamic Stability of Sus-pension Bridges with Special References to the Tacoma Narrows Bridge[R]. Washington: University of Washing-ton Engineering Experiment station, 1954.
- [24] Karman T V. Collapse of the Tacoma Narrows Bridge[J]. Resonance, 2005, 10(8): 97-102.
- [25] Matsumoto M, Shirato H, Yagi T, et al. Effects of Aero-dynamic Interferences Between Heaving and Torsional Vibration of Bridge Decks: the Case of Tacoma Narrows Bridge[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12-15): 1547-1557.
- [26] Plaut R H. Snap Loads and Torsional Oscillations of the Original Tacoma Narrows Bridge[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(3-5): 613-636.
- [27] Castellani A, Felotti P. Lateral Vibration of Suspension Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(9): 2169-2173.
- [28] Petroski H. Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgment in Engineering[M]. New York: Cambridge Uni-versity Press, 1994: 131-132.
- [29] 王晓倩, 曾诗琪, 冯彩霞. 悬索桥计算理论发展及其分析[J]. 工程与建设, 2017, 031(5): 596-599.
- [30] 蔡宪棠. 大跨度铁路悬索桥刚度研究[D]. 西南交通大学, 2010.
- [31] Steinman D B. Aerodynamics of Suspension Bridges[J]. Consulting Engineer, 1947, 2: 26-38.
- [32] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifica-tions[M]. 4th ed. Washington: AASHTO, 2007: 2-14.
- [33] Farquharson F B. The Collapse of the Tacoma Narrows Bridge[J]. Scientific Monthly, 1940, 51(6): 574-578.
- [34] Daquan Luo. Proceedings of Bridge Engineering 2 Con-ference 2007: Analysis of the Second Tacoma Suspension Bridge[C]. UK: University of Bath, 2007.
- [35] ASCE. ASCE/SEI 49-12, Wind Tunnel Testing for Build-ings and Other Structures[S]. Virginia: ASCE, 2012.
- [36] Mock E B. The Architecture of Bridges[M]. New York: The Museum of Modern Art, 1949.
- [37] Modjeski R, Masters F. Suspension Bridges and Wind Re-sistance[J]. ENR, 1941, 8: 97-100.
- [38] Hadley H M. Letter to the Editor[J]. ENR, 1943, 8(26): 317.
- [39] Scanlan R H. Studies of Suspension Bridge Deck Flutter Instability[R]. New Jersey: Princeton University, 1969.
- [40] 杨志飞. 以故障为中心的工程可靠性[M]. 国防工业出-版社, 1995: 21.
- [41] 张涛, 王大洲. 从工程事故中学习的过程及其制度安-排[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2013(3): 309-317.
- [42] 李伯聪. 略谈工程哲学中的问题和主义[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2007, 3(1): 41-48.

## Engineering Failure and Engineering Science: A Case Study of Tacoma Narrows Bridge

Yu Wenjie<sup>1</sup>, Wang Nan<sup>1✉</sup>, Zhao Zhengsong<sup>2</sup>

(1. School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Owing to the tradition of Western philosophy that emphasizes speculation over practice, engineering science and engineering knowledge have always been a “lost theme” in philosophy, and research on the growth of engineering knowledge has not been conducted extensively. Engineering failure is inevitable; however, it makes engineering scientists explore the problems of engineering science, promote the development of engineering science, and analyze the development of engineering knowledge. Taking the accident of the Tacoma Narrows Bridge in 1940 as an example, this paper presents an analysis of the process by which the accident resulted in the growth of several types of engineering knowledge, such as theoretical tools, quantitative data, criteria, and specifications, to reveal the significance of engineering failure in promoting the development of engineering science and engineering knowledge.

**Key Words:** engineering failure; engineering science; engineering knowledge; Tacoma Narrows Bridge