

Broadview®  
www.broadview.com.cn

*"When architecture is at its highest level of harmony,  
beauty is attained."*

架构之美

# 软件架构的艺术

The Art of Software Architecture

李伟 吴庆海 著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

*"When architecture is at its highest level of harmony,  
beauty is attained."*

架构之美

# 软件架构的艺术

Software Architecture

李伟 吴庆海 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

架构是设计一切系统的基础和核心。随着用户需求的变化及技术的发展，我们身边各式各样的系统也日趋复杂。如何在万象中剥离繁华，提炼事物的本质和精髓，“系统架构”正是化繁为简、打通两极世界的一门艺术。

架构之美，在于和谐。本套“架构之美”系列丛书，以期从业务梳理、流程建模、软件架构、设计模式等方面进行系统、全面地介绍。强调理论与实践相结合，国外发展趋势与国内本地应用相结合，打造华人精品书籍，给国内读者提供真正有指导意义的美食大餐。

本书聚焦于软件架构行业，全面介绍软件应用系统架构的基本原理、方法以及经典的实践经验。把握共同的规律，预知未来的发展，选择最佳的路径，尽可能减少成长的烦恼，并保持成熟的稳定，让企业充分享受属于架构整个生命阶段的华彩！

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

软件架构的艺术 / 李伟, 吴庆海著. —北京: 电子工业出版社, 2009.4  
(架构之美)  
ISBN 978-7-121-07670-1

I. 软… II. ①李… ②吴… III. 软件设计 IV. TP311.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 169126 号

责任编辑: 江 立

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 20 字数: 324 千字

印 次: 2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：(010) 88258888。

# 前 言

架构是设计一切系统的基础和核心。随着用户需求的变化、技术的发展，我们身边各式各样的系统也日趋复杂。如何在万象中剥离繁华，提炼事物的本质和精髓，“系统架构”正是化繁为简、打通两极世界的一门艺术。

万丈高楼平地起。随着中国经济高速成长，对“架构师”的需求愈来愈强烈，而培养一个合格的架构师需要漫长的周期。另一方面，市面上对于系统架构方面的高质量学习材料非常稀少，有限的相关书籍也只是对国外多年前一些经典书籍的简单复制和照搬，并不能全面系统地反映系统架构领域最新的成果和发展趋势。国内当前的现状是，软件系统的核心架构基本上掌握在国外少数系统架构人员手中，这其实也是中国软件行业未来迫切需要打破的一个壁垒。

为此我们策划“架构之美”系列丛书，下设《软件架构的艺术》、《设计模式的艺术》、《流程架构的艺术》3个子主题，以期从业务梳理、流程建模、软件架构、设计模式等方面进行系统全面的介绍。强调理论与实践相结合，国外发展趋势与国内本地应用相结合，打造华人精品书籍。从而打破系统架构方面的供需矛盾，给国内读者提供真正有指导意义的美食大餐。

架构之美，在于和谐。作为《架构之美》丛书之一，《软件架构的艺术》聚焦于软件架构行业，全面介绍软件应用系统架构的基本原理、方法以及经典的实践经验，并创新性地提出为确保高质量的架构设计而应该遵循的“**架构生命周期 Architecture Lifecycle**”理论。从而让我们把握共同的规律，预知未来的发展，选择最佳的路径，尽可能缩短成长的烦恼，尽可能保持成熟的稳定，让软件研发企业充分享受到属于架构整个生命阶段的华彩，这正是研究架构生命周期的目的之所在！

该书开篇对于架构的源起、软件架构的基本概念及软件架构的实际作用进行了初步的介绍。作为确保架构高质量的第一个视角或维度，本书详细阐述了行业内典型的架构从业人员的角色及其职责，并且从实践经验的角度对这些架构从业人员的能力要求进行了界定。

作为本书的第二块核心内容，本书详细阐述了经典的架构工作流程及架构工作中的实际经验指导，同时详细介绍了架构实践中确保高质量架构所利用的实施手段。作为衡量这些手段的标准，本书也从实际操作的角度推荐了一些衡量架构质量的标尺，架构从业人员可以借鉴这些标尺来准确评判自己的实践工作。

作为本书第三块重要的部分，本书详细介绍了一个实用的架构评价体系，即架构评审。在架构评审的章节中，读者可以看到实践中经典的评审手段、实际工作中针对不同类型系统的评视角和问题列表。这些内容对企业信息系统、实时系统、嵌入式系统等领域的架构从业人员有着极强的借鉴作用。

作为架构生命周期中另一个重要的方面，系统架构进入生命的中后期时，为了增强系统的生命力并提高系统维护效率，系统架构的恢复和重构在实际工作中同样有着重要的实践意义。

最后，作为软件架构领域应用的热点和难点，本书揭示了架构思想在软件产品线架构的实践应用。这个领域是国内鲜见但又需求强烈的一个领域，作为本书重要的经验补充，希望可以抛砖引玉，供读者借鉴。

本书涵盖了软件架构生命周期中涉及的创建、评审、执行、演化恢复等重要活动、流程及实践经验。提纲挈领、高屋建瓴、深入浅出，从方法论的高度，系统性地介绍了关于软件架构方面的基本概念、体系及方法。希望能够给相关领域从业人员以帮助，缩短他们学习和成长的周期。

作者力图最大限度地利用国外当前最新的研究成果，并结合自己多年的实际经验，希望能够做到系统、全面、精准地介绍“软件架构”领域的概念、体系及方法。以期纠正目前国内在该领域内一些模糊、片面、不准确的认知。

从发展的趋势看，我们的技术人员在成长，经验在逐渐积累并向着国外最高水平靠拢。希望本书能够成为这个大趋势中未来精英力量的一个有力铺垫。最后，祝愿中国的系统设计行业有更长足的发展。

# 作者序 1

“请问 Wangler 博士，您认为在一个产品研发机构内，研发流程和系统架构技术哪个更为重要？”这是我和本书合作者吴庆海博士在一次工作晚餐时向西门子医疗研发部门的前负责人及总架构师 Wangler 博士提出的问题。大多数读者或许只知道西门子医用 CT 机系统，但是未必知道它只是西门子医疗部门的核心系统之一。从另一个角度来讲，西门子在世界医疗设备及技术上的领导地位，是和其在医疗系统架构及相关技术上处于领先地位密不可分的。这些辉煌的成就，作为总架构师的 Wangler 博士是功不可没的。

我们之所以问 Wangler 博士这样一个问题，就是想先拿一个争论比较激烈的话题作为引子，目的是想听听一位架构权威人士是如何看待产品研发中系统架构这个问题的。当 Wangler 博士听到我们的问题后，稍作沉吟，然后回答：“嗯，虽然我认为两个方面都很重要，但是我个人认为系统架构还是比研发流程更核心一些。这是因为，系统架构……”从一个资深前辈那里，我们可以明显地感到，系统架构技术在他心目中是多么重要。

既然资深专家谈到了架构的重要性，那么让我们再来看看真实世界的另外一面。由于工作的关系，我也接触过很多自称是系统架构、设计、咨询的行业内人员。我经常发现他们整天在谈论什么解决方案、什么平台、什么系统架构。但如果我要求看一个系统的架构时，看到的却只是千篇一律的分层风格的系统概念图。更令人惊讶的是，很多从业人员认为这就是架构！如果再仔细追问，就会发现这样一个普遍现象：他们对该系统架构所能谈到的深度经常只停留在 What 层面。可是，谁又能相信一个只知道 What 而忽略了 How 的架构师，能够构建和设计出一个生死攸关的软件系统呢？

坦率地讲，这种现象表明了软件系统架构和设计行业内的从业人员普遍缺乏专业性。我与西门子首席架构咨询顾问，也是世界架构行业著名的 Frank Buschmann 进行过合作。就连 Frank 这样一位系统架构界的泰斗也对这样的现象发出过类似的感慨：做过几个项目，有了一些经验，就以为自己可以战无不胜了。系统架构如果真是这么简单，谁都可以仅凭借自己的直觉经验和天真而未经考证的手段，就能研发出诸如航空管制系统这样与生死紧密攸关的复杂软件系统了。

系统架构与设计是一个严肃的工程过程。下面这些问题或许可以帮助读者了解一个真正架构师的职业视角，这也是我写这本书的初衷之一：

- 我们都知道“一叶障目，只见树木，不见森林”这句话。应用到架构，该怎么理解呢？

- 系统架构界有这样一句经典的明言——“为了做一个系统，而先做一个系统”，该怎么理解这句话呢？
- 你说自己的架构和设计是正确可靠的。这只是口头的保证，还是能拿出什么证据？
- 就一个细节话题来讲，解决系统的性能问题，你知道业界有哪些经典的做法？
- 你如果是一个总架构师，在进行一个系统架构工作时，纯技术因素有哪些方面？除此之外，还有哪些问题你认为会成为震撼性的问题？
- .....

上述这些问题看似抽象，实则非常具体。并且这些问题都非常注重 **How** 的方面，即如何做。毕竟，如何完成一个任务、如何解决一个问题是最困难的事。从这个角度讲，我认为一个好的架构师首先就应该是一个好的工匠。

谈到工匠，大多数中国同仁会不屑一顾。我曾经多次与德国同事一起工作，发现一个有意思的现象：德国人历来以自己是专业工匠而自豪。这是因为他们与生俱来且固执地认为：只有好的工匠才能做出好的产品。开始我并不能完全理解这种情怀，但通过长期的合作，我才慢慢理解了德国人那种工匠型态度里，其实蕴涵了这样一个道理：做一个产品或研发一个系统，需要专业工作人员具备如下工匠型的素质：**即全面且又面向重点细节的思路，参考前人的实践经验，聚焦问题的症结，采用安全且有创意的手段，追求完美的精神。**这种对专业工匠型人员的理解，是促使我为中国读者奉献此书的一个原因。

进行一次大规模复杂系统的架构和设计活动，永远不会是一件简单、轻松的任务。在整个世界范围内，出现了许多有关软件架构和设计方面的文献及书籍。但由于这些研究散布的领域很广，又有点让人无从下手的感觉。由于当今业界（尤其是国内）还没有形成系统架构这一领域的系统化阐述，这正是促使我们为读者奉献一本凝聚个人系统架构领域经验书籍的另外一个原因。

大家都知道这样一句名言：“**No Silver Bullet**”。任何一套方法论或问题解决手段都有其明显的适用场合和历史发展局限性。我希望广大读者能够在本书所展现的这个系统架构平台的基础上，进行大胆的创新和尝试。毕竟，有生命力的科学，才有绚烂的未来。

我在本书写作的过程中，得到了夫人及家庭其他成员的大力支持。当然，本书的合作者吴庆海博士的鼎力相助也是我深为感激的。不能忘记的是，在论据、论点及文思方面我也得到了身边同事及朋友的指点和帮助。在此，我再次感谢所有那些曾经帮助和支持过我的友人。

最后，祝读者“读万卷书，行万里路”，也祝中国的系统架构行业蒸蒸日上！

李 伟

2009年1月

于北京

## 作者序 2

当今，中国的产业在不断发展和升级的过程之中。20 世纪 80 年代以服装、皮革、玩具、造纸、家具等为代表的劳动密集型行业（**Labor-intensive Industries**）经历了迅猛的发展；之后以机械、食品、饮料、烟草、纺织等资本及劳动密集型行业（**Capital & Labor-intensive industries**）以及家电、通信设备、电脑、手机等创新型但较容易被模仿的高科技行业（**Easily imitable & innovate high-tech**）为代表，亦以惊人的速度发展着；目前，我们更是面临交通、自动化、能源、医疗、楼宇等行业的挑战，这些行业普遍都需要复杂的技术、设备及系统，属于典型的知识技术密集型行业（**Knowledge & Technology-intensive industries**）。

我们过去的发展多是以高能耗、高污染、低价值为特点；未来中国欲在更高产业价值链上进行竞争和升级，就必须培养自己在“系统架构”方面的核心能力，因为这是迈向产业高价值链必备的基础。这些知识技术密集行业，需要大量有着对大型、复杂、技术密集设备及系统具有丰富经验的专业“架构师”。遗憾的是，由于中国在该领域发展的时间太短，系统架构的核心能力基本上被跨国巨头企业所掌握，我国非常缺乏“系统架构”方面的合格人才；许多人欲得其门却又不得其法而入。因此，本书的出版，希望能够对那些有志于“系统架构”领域的人们有所获益。

笔者认为，“系统架构”不仅仅是站在技术的层面，其思想可以拓展到更高的境界。它是对勾画事物整体框架的高度抽象和思考。无论是机场行李分拣系统的设计，还是医疗设备核磁共振 MR 产品的开发，甚至是对未来组织发展蓝图的业务情景规划，“系统架构”的理念和方法都必不可少。在此笔者特别想强调如下两点。

### 其一：“拆分”——化复杂为简单的法门

宇宙万物，气象万千。大至一个星球，小到一粒尘埃，事物本体都是复杂的。面对这样的困境，人类也想出许多办法来认识这个变化莫测的世界。例如数学界的微积分、工程界的有限元计算方法、项目管理学科中的工作结构分解 WBS 等，其精髓就在于“拆分”！拆整为零，化复杂为简单，这是人类面对复杂问题时的一种处理方法。针对复杂的问题，我们不妨将其拆分，分解为一个一个单元；如果还不够，则将每个单元再进行拆分；如此逐级细分，直到我们能够进行分析及处理为止。在系统架构中，我们将系统（**System**）拆分



为子系统（Sub System），再将子系统拆分为构件（Component）及单元（Unit），也是基于同样的道理。现实中许多人总喜欢将简单问题复杂化，殊不知将复杂问题简单化更是考究自身功力、窥探事物奥秘及规律的关键。

## 其二：“整合”——连局部为整体的纽带

需要特别注意的是，逐层拆分时，我们还必须克服机械式的“只见树木、不见森林”式的细化。如果只关注局部细节，一叶障目，失去整体的系统思考，则非常容易坠入盲人摸象般的误区。运用“整合”的纽带，连局部为整体，以充斥着高度提炼和抽象的大局观思维为纲，在我们拆整为零的同时，仍然能够还原系统的整体原貌。在系统架构中，无论是对于商业总体运作概念（Overall Business Operational Concept）的勾画，还是利用系统间事件跟踪模型的构建，或是系统/子系统/构件间的接口规划及汇总，都是强调运用系统思考问题的方法，不失系统总体原貌，构建出局部之间的联系和连接。

即见树木，又见森林。构建系统架构时，既要高屋建瓴，又要细致入微。不失森林，不遗树木。当整体与局部之间达到高度的和谐及统一之时，所谓架构之美，尽在于此。如何达到尽善尽美，则是架构师殚精竭虑毕生追求的梦想。汲取他人的智慧，借鉴最佳实践，是经过验证非常有效的取巧之法。例如尽可能地应用架构模式及设计模式，尽量参考软件架构与设计流程里的规范动作等，可以使我们事半功倍。

对于工作及著书的合作伙伴李伟先生，我经常开玩笑说他是我工作中最重要的收获之一。他深厚扎实的架构技术功底、多年历练的项目经验、较真时舍我其谁的火爆劲头以及关键时刻强硬的工作风格，都向我昭示出一个性格鲜明、独具特色的“总架构师”风范。在为客户提供架构服务的项目及研究实践中，我们也结下了深厚的友谊。我们特别希望结合各自的长处，倾注心血来完成一本能够对中国系统架构领域有益的书籍。

如同孕育婴儿一样，写书也是一个艰苦而漫长的准备、孕育、分娩的过程。感谢在此过程中给予我帮助的家人、同事及朋友。巧的是，一直默默支持我的妻子阿丹竟然又给了我一个生命的惊喜，伴随着本书，她竟然也怀孕在身，感谢上苍赐予我们一个宝宝！敬以此书献给对我事业不断鞭策和支持的妻子，敬以此书献给即将出世的可爱宝宝！

面对全球化产业价值链分配的不断变化，我们真心希望，中国能够提前做好准备，不断超越自己，晋入一种全新的境界。

吴庆海

2009年1月北京

# 目 录

第 1 章 软件架构介绍 .....	11
1.1 引子 .....	11
1.2 架构的源起 .....	17
1.3 系统架构与软件架构 .....	19
1.4 软件架构的历程 .....	24
1.5 软件架构的误区 .....	36
1.6 软件架构生命周期 .....	39
第 2 章 企业中的架构师 .....	42
2.1 软件架构师的定义、分类和职责 .....	42
2.2 软件架构师具备的素质 .....	50
2.3 架构师与职能经理 .....	61
2.4 架构师与开发人员 .....	65
第 3 章 工作中的架构师 .....	68
3.1 解决商业问题 .....	70
3.2 解决架构问题 .....	73
3.3 解决设计问题 .....	76
3.4 解决编码实施问题 .....	79
3.5 工作中的沟通 .....	82
3.6 运用架构框架及工具 .....	85
第 4 章 软件架构与设计流程 .....	90
4.1 构建商业架构概念 .....	93
4.2 构建应用架构概念 .....	114
4.3 确立和稳定架构基线 .....	118
4.4 子系统架构及设计 .....	136
4.5 构件与单元设计 .....	143

4.6	架构/设计流程中的角色和职责	145
<b>第 5 章</b>	<b>软件架构及软件质量</b>	<b>148</b>
5.1	构建符合质量要求的系统架构	153
5.2	架构构建重点考虑因素	163
5.3	衡量系统架构的质量	175
<b>第 6 章</b>	<b>软件架构的评审</b>	<b>184</b>
6.1	架构评审目标确定	187
6.2	架构评审计划制定	189
6.3	架构评审输入收集	191
6.4	架构评审方法和技术选择	198
6.5	架构评审输出汇总	216
6.6	架构评审实践指导	217
<b>第 7 章</b>	<b>软件架构的恢复与重构</b>	<b>220</b>
7.1	反向工程和正向工程	224
7.2	架构和设计恢复	227
7.3	架构和设计重构	237
7.4	系统代码重构	251
<b>第 8 章</b>	<b>软件产品线架构</b>	<b>257</b>
8.1	软件系统产品线基本概念	260
8.2	共性和可变性分析	263
8.3	构建软件产品线架构	276
8.4	软件产品线架构的演化	286
8.5	软件产品线的管理因素	293
<b>第 9 章</b>	<b>软件架构的未来</b>	<b>297</b>
9.1	当今架构的潮流	297
9.2	未来架构的发展	300
	<b>词汇表</b>	<b>302</b>
	<b>参考文献</b>	<b>307</b>

# 第 1 章 软件架构介绍

经常，我们会涉及系统架构、面向对象的架构（SOA）、软件架构等词，那么到底什么是“架构”？什么是“软件架构”？“系统架构”与“软件架构”有着怎样的区别和联系？“系统架构构建”和“系统设计”之间有什么区别和联系？

本章带着这些问题，追本溯源，对于架构及软件架构的一些基本概念及发展历程做一番说明。同时对一些人们认识上的误区进行分析，以还原事物的真实面目。



## 1.1 引子

时间就像一条奔腾不息的大河，大浪淘沙，方显金石。翻开人类的建筑工程史，遍布世界各地，跨越几千年的时空，我们可以看到许多辉煌成功的工程。但是，人们往往最容易遗忘那些被历史长河所淹没的惨痛失败。而实际上，人类建筑的伟大成就，就是建立在这一系列失败的教训之上。既然“失败是成功之母”，那我们就以一个有代表性的失败工程，作为我们走向成功的基石和开始。这个惨痛的教训，就是塔科马大桥（Tacoma Narrows Bridge）。

如果您现在从西雅图国际机场附近的塔科马前往华盛顿州的奥林匹亚区，在 16 号公路上有一条必经之桥，它如同一道美丽的钢架彩虹跨过了普及特海峡。这就是著名的塔科马

大桥，如图 1-1 所示。



图 1-1 现今的塔科马大桥

竣工于 2007 年的塔科马大桥是目前世界上最长的悬索双桥，桥长 1600 米，悬索跨度 850 米。这真可谓是一项令人赞叹的伟大工程。但是，几乎每一个桥梁建筑设计人员都知道其大名的原因，并不是由于该桥像金门大桥那样是桥梁史上最著名的大桥，而是由于其前身老塔科马大桥（其绰号为 **Galloping Gertie**）的倒塌，是桥梁史上最著名的失败缘故。

老塔科马大桥是普及特海峡上的第一座大桥，1938 年 11 月开始建造，于 1940 年 7 月竣工，总耗资 640 万美元，是当时世界第三长跨度的桥梁。因为先前美国海军考虑到附近海军基地的需要，提供了部分建桥资金，并且旧金山金门大桥的设计者、著名的桥梁大师 **Joseph B. Strauss** 和 **Leon S. Moisseiff** 提供了设计咨询意见。因此，老塔科马大桥的竣工，使大桥成为了宾夕法尼亚州经济及军事的重要门户。它被当时的媒体和桥梁行业美喻为“人类坚定不移的独创精神的结晶”，如图 1-2 所示。

然而，大桥建成后不久，驾车跨越大桥的人们就发现该桥会随风不停地左右摇摆。虽然桥中心线保持了相对的稳定，可是整个桥面两侧却在上下起伏。这样有趣的现象竟吸引车辆排起了长队，竞相等待开上这座像醉汉一样摇摆的索桥，去体会一下这奇妙的感觉。虽然桥梁设计师们也注意到了这样的不稳定现象，但是他们信誓旦旦地保证“桥梁是安

全的”。

但是事实毕竟让某些相关人员开始有些担心，所以从 1940 年 7 月底开始，在华盛顿大学教授 F.B. Farquharson 的指导下，他们开始对桥梁的这种奇特振动开始进行研究。他们拍摄了大量的照片和影片，记录下了大桥的振动方式，并且在试验室里开始进行一定规模的试验，试图找到相应的方法来有效地降低桥梁的振动，如图 1-3 所示。

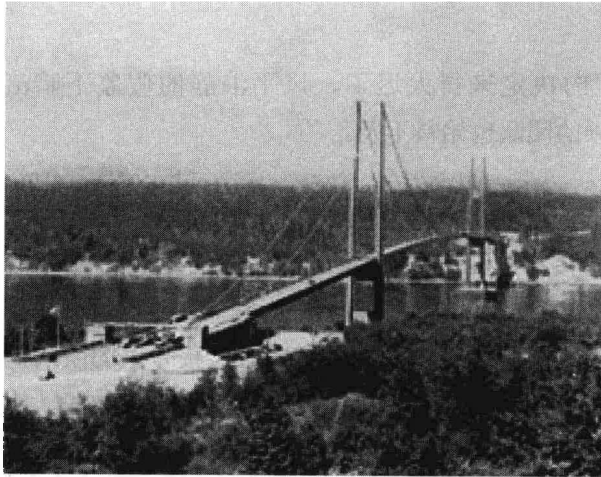


图 1-2 1940 年竣工的老塔科马大桥



图 1-3 F.B. Farquharson 对大桥进行观测

经过 Farquharson 教授所带领团队的观测和试验，最初的解决办法是在桥梁正中央的桥底部，安装一些钢缆，把这些钢缆从桥底固定到地面。可是在施工过程中，这些钢缆在风力拉动桥梁的作用力下完全断裂，施工没能成功。随后，试验人员又给出了一系列其他相应的固定桥梁的办法。例如，在桥梁的侧梁上钻洞，这样可以减小风力对侧梁的推拉力；或者在桥梁的侧梁上安装一些风力导流器，这样可以减小阵风正面直接对侧梁的推拉力。1940 年 11 月初，桥梁的投资方最终同意了这些加强措施，并且打算在接下来的几周内完成施工。

遗憾的是，这样的决定来得太迟了，风平浪静的假象下暗流涌动，甚至连 F.B. Farquharson 教授带领的团队也始料不及。

11 月 7 日清晨，顺着海峡吹来越来越强劲的大风，大桥开始了人们熟悉的摇摆和振荡。桥上车辆和行人依旧穿梭往来，享受着一如既往的那份惬意的晃动。9 点 45 分，大风时速达到了 68 公里。桥面上下交替晃动，两侧落差急速增加，最大时达到一米多，整个桥面仿佛成了过山车回旋的轨道一样。当时 Farquharson 教授带领的团队正在桥面中央拍摄大桥晃动的场景，以便为即将开始的大桥风力导流工程提供设计数据。他们拍摄到了一位记者 Leonard Coatsworth 正在驾车载着自己的爱犬 Tubby 非常缓慢而惬意地穿过大桥，一对夫妇也驾驶一辆小型货车紧随在记者的车后。教授拍摄的影片所记录该景象的时间是 10 点 13 分左右。

10 点 14 分，整个桥面的起伏急剧增加，两侧落差最大时达到两米多。数千吨重的钢铁大桥仿佛变成了一条抖动的缎带，长长的波浪式起伏飘荡在整体桥面上。情况还在继续恶化，整个桥面开始无规则地扭曲在一起，给在场的人一种强烈的恐惧感。事后 Leonard Coatsworth 叙述说：“当我刚刚开过桥头进入大桥时，大桥就开始疯狂地上下左右晃动起来。我意识到必须马上停车，否则轿车就会完全失去控制。我用力紧急停车，打开车门。可以说我是被扔出车厢的。我看到车子被强烈的晃动推得左右摇摆，并且我开始听到了水泥断裂的可怕声音……” Leonard Coatsworth 的爱犬 Tubby 也紧随着主人跳下了车，车后的那对夫妇也急忙跳下自己失控的卡车。这一切都被在现场拍摄的 Farquharson 教授看到并且记录在影片中。当教授和所有行人安全地回到桥头时，他们看到巍然屹立的大桥突然断裂！束缚整个桥梁的钢缆完全崩断！整个桥面轰然倒塌！庞大的桥体拍落到下方普及特

海峡的水面上。桥面上 Leonard Coatsworth 和那对夫妇的车子也仿佛电影中的慢镜头一样，随同桥体落入海峡。整个事件从发生到结束没有超过两分钟。目睹整个过程的所有人都惊得目瞪口呆。可怜的小狗 Tubby 也一同掉落进普及特海峡，成为这次事故的唯一遇难者，所幸没有其他人员伤亡。

1940年11月7日早上11点15分（美国太平洋时间），塔科马大桥轰然倒塌，如图1-4所示。后人称之为“桥梁建筑史上的珍珠港”。对普及特海峡来说，倒塌的大桥也成为了世界上最大的人造礁石之一。1940年11月28日，美国海军的水文办公室报告称，桥梁遗骸的地理坐标是（47.16'00"N，122.33'00"W），深度180英尺（55 m）。



图 1-4 倒塌的老塔科马大桥

当人们从大桥的倒塌事件中回过神来后，工程设计人员开始分析大桥被风“吹”断的原因。

首先，大桥的施工质量是无可挑剔的：使用了高质量的板型钢材及性能稳定的水泥，整个施工过程被严格监督。整个桥梁是用板型碳钢大梁坚实地支撑着，大梁被深深地固定在巨大混凝土桥墩上。但可惜的是，这样看似设计完美的悬索桥，却忽略了一个重要的问题：由于风力带来的共振和扭力。可以理解，当时的桥梁工程还没有总结出这样的设计实践。



在塔科马大桥之前，世界上其他的悬索桥大多采用具有开放式孔格结构的大梁。这样的大梁对风力的扰流效果很好，所以不会使风振的能量聚集。但是对于塔科马大桥这样板型钢质大梁的新型悬索桥来说，板型设计结构会把风力牵制在桥梁断面上。这样被牵制住的风力，会造成两种的扭转模式：共振模式和扭力模式。共振是一种纵向的扭力，意味着振动力沿着桥梁的长度发生作用，塔科马大桥也不例外。所以出现了以大桥中央为分界点，桥面顺着桥长上下起伏的现象。这样，司机会看见对面开来的汽车有时会消失在跌宕起伏的桥谷中。

但是，共振模式并不是导致桥梁坍塌的原因。当时的风速达到了每小时 68 公里，一旦风力达到这样的强度，第二种扭转模式“扭力模式”就开始作用于大桥。当时在坍塌现场的人们可以看到，桥上的路面出现了两侧路面交替上升、下降的现象。如图 1-5 所示。

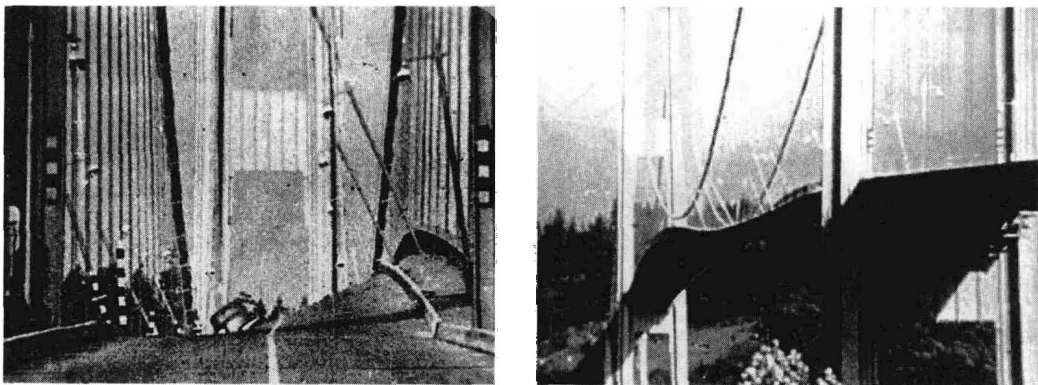


图 1-5 扭动中的老塔科马大桥

应该这样说，对所有桥梁设计来讲，桥面与水面的长距离，造成了穿过桥梁的风力对桥梁本身的振动。因为当风吹向桥梁时，风力将分流绕过其桥梁断面而形成周期性交替的风流。周期性交替的风流绕过障碍物时会使桥身产生共振。当风速达到一定程度时，风力对桥梁这样有明显仰角的物体会产生强烈的扭力。周期性的共振加上扭力累积到一定幅度时，就会引起桥梁的折断。如果不能有效降低这种逐渐增大的振幅和扭力，桥梁的安全就难以得到保障。

桥梁界最后给出的正式结论是震撼而有深远借鉴意义的：“塔科马大桥使用了崭新而没