

桥梁工程 液体黏滞阻尼器 设计与施工

陈永祁 著



内 容 简 介

从 20 世纪 80 年代开始,美国结构工程师首先开始将在机械、宇航等行业已经成功应用的液体黏滞阻尼器作为结构保护系统成功地应用于桥梁抗震,并形成迅速发展的一支独秀。它是“花钱不多,对桥梁帮助不小”的一个减震装置,在我国正在建设的许多大跨公路桥梁、铁路桥梁,城市和高速路上高架桥梁抗震工程中广泛应用,并受到肯定。

本书详细介绍了世界最先进的液体黏滞阻尼器的发展过程,阻尼器的设计原理和构造,在桥梁上的应用理念和计算方法以及阻尼器的检测和质量保证。

泰勒公司(Taylor Devices, Inc.)是美国最早开始研究测试并发展起来的结构工程用阻尼器生产厂家,泰勒公司在世界各地完成了近 120 多项大型桥梁工程,其中在我国包括以苏通长江大桥、江阴长江大桥、舟山群岛西堠门跨海大桥和津秦铁路大桥等为代表的 30 多座大跨桥梁,书中对这家公司以及其液体黏滞阻尼器安置情况进行了介绍,同时也给出了国内外一些桥梁阻尼器的计算过程。

本书可供从事桥梁设计与施工的工程师、教授等专业人员设计应用参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工/陈永祁著. —北京:中国铁道出版社,2012.3
ISBN 978-7-113-13943-8

I. ①桥… II. ①陈… III. ①桥梁工程—粘性阻尼—阻尼器—设计 IV. ①U442.5
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 010258 号

书 名: 桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工
作 者: 陈永祁

策 划: 许士杰 陈小刚
责任编辑: 曹艳芳 电话: 010-63549495 电子信箱: cxgsuccess@163.com
助理编辑: 陈小刚
封面设计: 冯龙彬
责任校对: 孙 玫
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 北京铭成印刷有限公司
版 次: 2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 22 插页: 2 字数: 550 千
书 号: ISBN 978-7-113-13943-8
定 价: 80.00 元(配盘)

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873170(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010) 63549504,路电(021) 73187

作者简介

陈永祁,1966年毕业于北京工业大学土木建筑系结构专业,从事建筑结构设计与施工工作。1976年唐山地震后,考入中国建筑科学研究院工程抗震研究所,从师龚思礼、刘锡荃,1981年毕业获得硕士学位后在中国建筑科学研究院抗震所工作。1986年出国,在美国纽约州立大学布法罗分校土木建筑系攻读博士学位,指导老师 T. T. Soong,研究美国国家地震研究中心地震工程和结构控制的课题,1989年获得工程博士学位。毕业后在美国核电站设计公司(Sargent & Lundy)的研究和发展部门工作,任高级工程师。

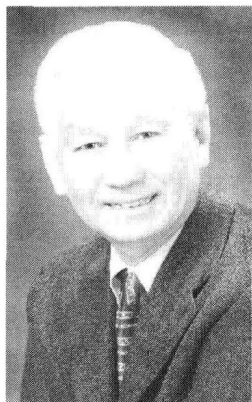
1998年应中国建筑科学研究院抗震所原副所长韦承基教授邀请,回国参与并完成了北京火车站抗震加固改造及阻尼器工程的计算,同时首次将美国 Taylor 公司的液体黏滞阻尼器引到国内结构工程中应用。

2005年回国创办北京奇太振控科技发展有限公司,推广和发展世界最先进的液体黏滞阻尼器和摩擦摆隔震等结构保护系统在国内的应用。作为一名工程师,笔者一直重视先进技术在工程中的应用。从1998年到现在,其领导的北京奇太振控科技发展有限公司已经在国内外完成了包括苏通大桥、江阴大桥、印尼马杜拉大桥等30多座大跨桥梁、10多个包括北京银泰中心、盘古大观、武汉保利大厦在内的超高层建筑、上海东航机库大跨结构、迪拜赛马场屋顶 TMD 屋顶系统等阻尼器或 TMD 工程。

笔者希望通过自己的努力,让世界最重要的桥梁工程、最大的桥梁市场——中国与世界最先进的桥梁技术接轨,用上世界上效果最好、最可靠、最耐久的结构保护产品。到目前为止,在国内外期刊上发表了近50篇学术论文,涉及的领域有地震工程、随机振动、附属结构地震反应和国际近20年发展起来的结构地震保护系统。

致 谢

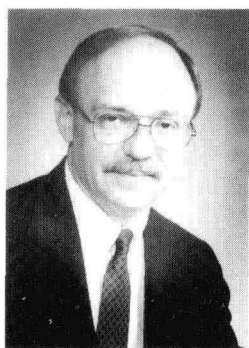
我要真心感谢对我完成本书给予很大帮助的三位美国著名专家、教授,在他们不断地教诲、指导下,本书才能得以顺利完成。以下是我所了解到的三位专家情况,简单地介绍给大家:



宋祖德教授(Prof. T. T. Soong),作为我在美国纽约州立大学布法罗分校的博士导师、带我进入美国结构工程界的领路人,当然是我要首先感谢的。宋教授作为首先把当今世界最先进的结构健康监测、优化理论、主动和被动控制理论、随机振动分析的理论引入我们工程结构的领头人、创始者,对科学上一丝不苟,又尽力把最深的理论结合到实际工程的应用中,创建了世界上一批又一批结构控制的建筑工程。百忙之中他还对我们学生各方面无微不至的关心和照顾,令我们永远铭刻在心。

TSU T. SOONG, P. E. SUNY Distinguished Professor Emeritus, State University of New York at Buffalo and Chair Professor in Engineering Science (part-time), The Hong Kong Polytechnic University. B. S., 6/1955, Mechanical Engineering, University of Dayton, M. S., 6/1958, Engineering Sciences, Purdue University, Ph. D. 1/1962, Engineering Sciences, Purdue University. Since 1963 Assistant Professor, Associate Professor, Samuel P. Capen Professor of Engineering Science, SUNY Distinguished Professor to Distinguished Professor Emeritus (9/2009-Present). One of the founders for structural control, distinguished contributor for Probability and Statistics for Engineers, Random Vibration of Mechanical and Structural Systems. Published 11 books, 134 papers in Journals, 141 in Conference Proceedings, obtained 11 Awards, National Science Foundation Science Faculty Fellowship, the two ASCE medals (Norman Medal and Newmark Medal) etc. One of five individuals who collaboratively established the National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) at the SUNY Buffalo in 1986. As a world leader in development of seismic response technologies for structures. Most notably, Dr. Soong served on National Science Foundation's structural control panel in 1990's where he represented the US in developing world-wide research collaborations on seismic response control. This effort resulted in several implementations of passive and active control systems in US, Japan and China.

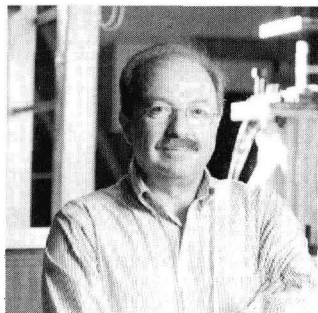
道格拉斯·泰勒 (Douglas P. Taylor),当我从“Taylor”路走向这个小工厂,为北京火车站找寻加固采用的阻尼器时,绝不会想到这个不起眼的工厂竟然孕育着这么多我们结构工程师所希望了解的知识,也不会想到这个工厂的总裁竟然不仅对这个领域的产品有着深刻的体会和了解,而且对我们结构工程领域有这么多值得参考的看法。几乎每个周末他都会对我讲述



他的经验、体会和理论。我们大部分对产品的认识、很多工程经验也大都来自他取之不尽的知识。

DOUGLAS P. TAYLOR, Mr. Taylor holds a B. S. degree in Mechanical Engineering from the State University of New York at Buffalo, awarded 1971. He has been employed by Taylor Devices, Inc. of North Tonawanda, NY since 1971, and was appointed President in 1991. He is inventor or co-inventor of 32 U. S. and foreign patents, and is widely published with more than 65 technical publications. Mr. Taylor has received numerous awards, including the

Franklin and Jefferson Medal by the US Government's Small Business Innovation Research program, the Clifford C. Furnas Memorial Award by the UB Alumni Association, and the Dean's Award for Engineering Achievement by the UB School of Engineering and Applied Sciences. Mr. Taylor was named Structural Engineer of the Year (2006) by the Engineering Journal, "The Structural Design of Tall and Special Buildings". Mr. Taylor is also a founding member of the International Association on Structural Control and Monitoring.



康斯坦汀诺教授 (M. C. Constantinou) 作为世界“结构抗震保护系统”重要的开创者之一,他从二十多年前开始构思,到研究试验,再到工程试用,编制“结构保护系统”实际工程设计规范,在这个领域里起了重要作用。我很荣幸,能作为他的学生、经常得到他的教诲,听到他对土木工程里各种问题的看法。为了完成这本书,他的著作和论文是我们主要的参考文献之一。我对他给予我的帮助感激不尽。

MICHAEL C. CONSTANTINOU, Professor in the Dept. of Civil, Structural and Environmental Eng. and Director of the Structural Engineering and Earthquake Engineering Simulation Laboratory, Univ. at Buffalo, State University of New York. He received a Diploma (5 years course) from the Univ. of Patras, in 1980, M. S. in 1981 and Ph. D. from Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N. Y. in 1984, all in Civil Engineering. Dr. Constantinou served as member or chair of various committees for the National Earthquake Hazard Reduction Program (US NEHRP), the Applied Technology Council (e. g. , ATC-63), the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA), the T-3 Seismic Design Task Group (AASHTO), and the Seismic Isolation Committee of American Society of Civil Engineers (ASCE). He published as author or co-author over 200 books, papers and reports. He consulted extensively on the analysis and design of structures with seismic protective systems worldwide. He received several awards, including the 2002 Grand Award of the American Council of Engineering Companies for the design of the Ataturk Airport in Turkey, the 1994 GSA Award for Federal Design of the US Court of Appeals in San Francisco and the 2005 ASCE CERF Pankow Award for the design of the Torre Mayor building in Mexico.

前 言

近 20 年来,用于桥梁减振的结构保护系统有了很大的发展。铅芯橡胶、摆动式金属摩擦抗震支座和液体黏滞阻尼器是在国际上迅速发展的几支独秀。在桥梁纵横两个方向上安置液体黏滞阻尼器已经成为桥梁抗震设计工作者的一个重要选择。几乎没有人再怀疑阻尼器是个“花钱不多,对桥梁帮助不小”的设备。我国正在建设的大型公路桥梁、铁路桥梁,为了达到减少桥梁各种振动的影响,纷纷考虑加设液体黏滞阻尼器。到目前为止,美国最早开始试验并发展起来的阻尼器生产厂家泰勒公司(Taylor Devices, Inc.),已经在世界各地,近 120 多项大型桥梁工程上安置了液体黏滞阻尼器,以减少桥梁的各种振动。其中,在我国以苏通长江大桥、江阴长江大桥、南京三桥、舟山群岛西堠门跨海大桥、金塘跨海大桥和津秦铁路大桥等为代表的 30 多座大跨桥梁也已安置了世界最先进的液体黏滞阻尼器。

目前这项技术仍处在发展和完善中,还有许多工作要做,出版本书的目的在于作一个阶段性的总结。书中介绍了美国工程师和研究人员对液体黏滞阻尼器设计 and 应用的一些理念、国内外的一些设计方法和步骤、相关计算机有限元程序的应用和设计结果的合理性分析及其判定表述;本书还提供了 30 多个实际桥梁工程中阻尼器的设置形式及采用的参数,并对 17 个不同形式的桥梁设计案例进行计算分析作出详细介绍,希望对桥梁抗震设计、研究能有所帮助。

不容怀疑,桥梁结构减振保护系统的质量控制和产品的检验对我国还是一个比较生疏的领域,本书将介绍一些国外的及我们安设在苏通和江阴大桥上的阻尼器装置的质量控制、测试的内容和检测标准,希望能对国内其他桥梁的设计施工、未来规范的编制和执行起到参考作用。

我国在苏通长江大桥的设计中,首次开创并应用了具有限位作用的液体黏滞阻尼器。金塘大桥、青岛海湾大桥以及我国为印尼援建的马杜拉大桥上都采用了这种先进的设计理念和方案。许多设计人员考虑在更多的桥梁上采用一些具有特殊功能的阻尼器,如受力更为复杂的熔断阻尼器、黏弹性阻尼器和金属密封无摩擦阻尼器等;根据应用的需要,我们还建议和发展了适用于铁路桥梁的新型阻尼器、桥梁检查车上适用的带磁头阻尼器。本书中会将这些阻尼器一一介绍给大家,希望更多设计者提出新的理念,和我们一起努力创造还没有人提出过的新型阻尼器、新的计算和应用方法。

本书中也介绍了一些阻尼器的安装、调试和连接的参考资料,希望对阻尼器的施工安装者有帮助作用。

虽然我们在江阴长江大桥加固工程、北京市区二环阜成门立交桥中获得了成功,积累了一些经验,但这与美国、韩国已经完成的近五六十座桥梁加固工程相比,显然还有很长的路要走。可以预见,液体黏滞阻尼器在桥梁工程加固、抗震升级、翻新上的应用是有很大潜力的。国外已经普遍应用的其他的铁路和公路高架桥、钢拱型桥梁、钢筋混凝土桥梁的抗震阻尼器都还有待我们去进一步开发。

说到液体黏滞阻尼器,我们不能不提起美国泰勒公司。20 世纪 50 年代创立的美国泰勒

公司一直是世界减振控制系统的先驱、先导。特别是结构工程中所使用的缓冲器、锁定装置和液体黏滞阻尼器,都是首先发源于泰勒公司在振动台上进行的产品试验,逐步走入工程界的、进而获得美国各种规范的认可、从而推广到世界工程界的广泛采用。笔者有幸与这家公司一道在中国推广这项技术及其产品,深深认识到,也不想回避,到目前为止,世界上还没有在技术上能够接近他们的产品。除了工程的应用,我们也尽量介绍阻尼器的结构组成和其本身的设计原理。我们坚信,只有很好地了解这些技术,才有可能制造出真正赶超世界先进水平的自主产品。

当然,我是个结构工程师,对机械原理了解有限,尽管出于工作性质,总是努力的想把相关问题讨论清楚,但是对阻尼器的工作机理还有很多不了解、不能回答的问题,和大家一起继续学习吧!无论在国内外研究单位还是设计院,我一生从事结构工程,所有考虑问题的兴趣和出发点都是实际工程。在对阻尼器的应用理论上,许多问题还理解不深,因而本文没有全部涉及,留给后来的工程师们学习和讨论吧!正是因为缺少以上这些内容,本书也就是本经验之谈的设计手册,但如果能对桥梁工程师的计算分析和设计有所帮助,我就感到非常荣幸了。

还要一点需要说明,本书中收集的实际工程算例大多取自我们参与的项目,但也有少部分并非采用了美国泰勒公司的阻尼器,有一些工程最终也并未按我们计算的参数进行实施。但我们认为,这些项目在结构和设计思路等方面确有特色,或许会对读者有益,这里也就把它列在其中了。

感谢中国公路学会桥梁分会曾宪武秘书长,铁道部工程设计鉴定中心张红旭教授对我们的鼓励,也感谢中交公路规划设计院、路桥集团桥梁技术有限公司、浙江省交通规划设计院、四川省公路规划勘测设计院、中交公路规划设计一院、中铁一院、二院、三院、北京市市政总院和我们一起走过的路。没有段玉凤、张克、张喜刚、林道锦、宋辉、许宏亮、崔冰、裴岷山、李正荣、徐国平、王仁贵、史方华、王晓阳、毛兆祥、李毅谦、郭河、邬贵全、蒋劲松、周益云、王应良、郑旭峰、王兴达、王向阳、李世文、李琦、岳振民、颜志华、宋顺忱、陈志颖、许振中、李承根、陈克坚、曾永平、张恺、焦驰宇、张连普、孙广龙等工程师和领导的合作帮助,我们是不能完成这些工作的。

特别要说明的是本书中江阴大桥的设计计算是由中交公路规划设计院林道锦博士提供的。印尼马都拉大桥的计算优化是由路桥集团桥梁技术有限公司郭河工程师提供的。北京市区二环路阜成门立交桥所使用的阻尼器的计算分析是由北京建工学院焦驰宇博士、北京市市政总院张恺高级工程师提供的。谢谢他们的支持。

当然我们也要感谢在美国给了我们很大帮助的 Dr. T. T. Soong 教授、Dr. Constantinou 教授以及美国泰勒公司的 Douglas Taylor 董事长、Mr. Robert Schneider 和 Mr. Craig Winter。

本书部分内容是我的助手马良喆硕士协助整理和编写的,部分桥梁的计算分析也是由他完成的,在此我要特别感谢并向大家介绍他的贡献。

当然我也要感谢在我们公司里所有共同工作过的同僚,特别是在韩家沱铁路长江桥上做过很多贡献的曹铁柱先生。

陈永祁

2011年10月1日

目 录

第 1 章 结构保护系统概述	1
1.1 结构保护系统概述	1
1.2 体系的阻尼和能量分配	8
1.3 其他形式的阻尼器.....	18
1.4 抗震隔离装置和阻尼器系统的生产厂网站.....	24
第 2 章 液体黏滞阻尼器	26
2.1 液体阻尼器的发展历史.....	26
2.2 用于土木工程领域的液体黏滞阻尼器的内部构造.....	29
2.3 液体黏滞阻尼器的设计.....	34
2.4 液体黏滞阻尼器在结构上应用的研发过程.....	38
第 3 章 具有不同功效的桥梁工程液体黏滞阻尼器	46
3.1 锁定装置.....	46
3.2 具有特殊功能的黏滞阻尼器.....	54
3.3 金属密封无摩擦阻尼器.....	58
3.4 其他类型阻尼器.....	64
第 4 章 产品检测和表现评估	71
4.1 简 述.....	71
4.2 美国对液体黏滞阻尼器的检测.....	72
4.3 几项重要测试的意义.....	82
4.4 动力测试及设备介绍.....	85
4.5 测试实例分析.....	93
第 5 章 桥梁工程阻尼器减振设计与施工	107
5.1 阻尼器应用概述	107
5.2 规范反应谱	114
5.3 附加黏滞阻尼器的结构分析方法	134
5.4 美国关于耗能减震的规范及设计方法	141
5.5 阻尼器动力性能的数字化模拟	151
5.6 参数取值对阻尼器减振效果的影响分析	159
5.7 人行桥减振的控制方法	170
5.8 斜拉索减振分析	176

5.9	铁路桥梁阻尼器的设计讨论	187
5.10	黏滞阻尼器的安装就位	197
第 6 章	阻尼器在公路桥梁工程上的应用实例	204
6.1	江阴长江大桥 ¹	204
6.2	江津观音岩大桥 ¹	208
6.3	石环公里 100m 拱桥(307 国道东工程) ¹	213
6.4	小沙湾黄河特大桥 ¹	217
6.5	仙神河独塔斜拉桥 ¹	226
6.6	印度尼西亚苏拉马都大桥 ¹	230
6.7	南京长江四桥	238
6.8	北京阜成门桥(抗震加固改造)	244
6.9	涪陵乌江二桥(斜拉索减振) ¹	249
6.10	Harsha 斜拉桥	252
6.11	5/91HOV 大桥	256
6.12	黏滞阻尼器和锁定装置在桥梁应用中的对比	259
6.13	小 结	264
第 7 章	阻尼器在铁路桥梁工程上的应用实例	266
7.1	韩家沱长江斜拉铁路桥 ¹	266
7.2	江津粉房湾长江大桥	275
7.3	津秦高速铁路桥	281
7.4	郑州黄河公铁两用桥(主桥部分) ¹	287
7.5	乌锡线黄河特大桥	292
7.6	小 结	297
第 8 章	结构保护系统的失效剖析	298
8.1	黏滞阻尼器失效分析	298
8.2	国外桥梁隔震装置的失效分析	305
8.3	经验和教训	312
第 9 章	最新研究发展	314
9.1	研究工作的深入开展	314
9.2	工程新动向	316
9.3	理论研究的展望	319
附 录		325
附表 1	泰勒阻尼器定型尺寸图	325
附表 2	泰勒公司阻尼器在桥梁工程上的应用实例	326
附表 3	部分计量单位换算表	338

第 1 章 结构保护系统概述

1.1 结构保护系统概述

在地震工程领域内,始终存在着难以解决的问题。虽然,随着科学和计算机技术的发展,计算分析手段越来越精确。然而由于地震荷载复杂而粗糙,且地震带来破坏的可能性非常大,发生概率又非常低。因此,长期以来工程师们往往是通过增强梁、柱、剪力墙的抗力等来被动抵抗,而很少采用更主动的办法减小结构所受到的地震力。

到了 20 世纪末期,这种现象有了很大的改变。因为以基础隔震、消能减振和振动控制为内容的结构抗震保护系统得到了迅速发展。人们吸收和采用其他航空和机械领域的成果,在传统结构构件之外增加了一些装置:如基础隔震(Base Isolation)、各种阻尼器(Damper)吸能、耗能系统、设置于高层建筑顶部的质量调谐阻尼系统(TMD)以及主动和半主动控制(Active Control and Semiactive Control)减震体系,这些都已经走向了工程实际。它们往往是一些机械系统装置,我们称之为结构的保护系统。结构保护系统对我们结构工程抗震上的发展称之为“革命”一点也不过分。对于结构工程师,这是一种新的思路,这种思路结合结构的动力性能,巧妙地避免或减少了地震、风力的破坏;对于预想不到的地震,对于还不十分清楚的多维振动破坏,它有着很好的预防和承受能力;它甩开了我们传统结构工程的理念和手段,转向外加设备,给破坏性大、发生概率小的工程抗震找到了一个好的解决办法;它标志着我们已经跳出了传统的增强梁、柱、墙以提高结构抗振动能力的观念,提醒我们重新审核一下“强柱弱梁”,“大、中、小地震”设计理念的缺欠和可能的改变,还使我们对已经广泛应用的剪力墙抗震体系探讨一个更好的取代办法;它更使我们认识到,以结构的破坏为代价的“延性设计”的不足和缺陷;并且它最合理地体现了“小震不坏,大震不倒”和美国的结构性能表现的四阶段的抗震原则。

近年来,结构保护系统的发展非常迅速。作为 20 世纪末期世界地震工程界最振奋人心的成果——结构的保护系统,在世界先进国家已经快速发展了近 30 年,形成了非常成熟的体系。这种新技术的使用不仅开辟了我们结构工程师的一个新天地,也确实解决了我们很多传统技术解决不了的问题。我国台湾对于结构保护系统的应用起步比国内要晚,但现在已经有几十个重要建筑、桥梁上安置了或正在安置黏滞阻尼器和金属屈曲约束支撑(BRB,UBB)。韩国建设的桥梁并不多,但近几年却在大量的原有桥梁上加设了抗震阻尼器增加其抗震能力。美国和日本是结构保护系统应用最多、发展最快的国家,在美国的主要地震区加州,不考虑结构保护,业主不会同意,主管部门也不会批准。

当然,主要用来抵抗地震作用的结构保护系统,对于大风、海浪、车辆等机械振动也同样能起到显著的减震效果,并在抵御上述振动中也得到了广泛的应用。

一般地说,结构的保护系统主要有以下几种(表 1.1.1)。

当然,从美国开始发展的 20 多年来,对结构保护系统,从来就不是同一个观点。无论试验报告、论文和规范,大家都不同程度上的从工程出发。但是在所有文字的背后都有一个“工程

应用的行为准则”，它可以推出结构工程师认可的想法和产品，这个“应用准则”并不是完全取决于产品理论上的先进性，甚至不取决于土木工程中短时间的使用和减震效果，而更多的是取决于下述几点：

表 1.1.1 结构保护系统的分类

基础隔震	被动耗散能量	半主动和主动控制	智能材料
夹层橡胶垫隔震	金属阻尼器	主动支撑系统	电流变(ER)
铅芯橡胶垫隔震	摩擦阻尼器	主动质量阻尼器(AMD)	磁流变(MR)
滑动摩擦隔震	黏弹性阻尼器	变刚度变阻尼系统(AVS)	压电合金作动器
滚动隔震层	黏滞液体阻尼器	油阻尼半主动控制	形状记忆合金作动器
支承式摆动隔震	谐振质量阻尼器(TMD)	主动拉索控制系统	
滚珠或滚轴隔震	液体谐振配重阻尼器(TLUD)	变摩擦可控阻尼器	

(1)产品在各种环境下，计算的准确性。我们讨论的是要参与我们结构受力分析的定量装置，绝不是一个“能起作用就可以”的定性产品。它应该是和我们结构分析其他精度相匹配的精确“构件”。

(2)产品应该是免维护，并且能重复使用。我们并不想、也完全可以做到所用的结构保护装置不是想在我们建筑上再加装一个像空调、电梯、暖气这样需要经常维护的产品，而是希望它能和其他结构构件一样，基本上是免维护的装置。在数次地震、大风和其他振动中能自动回位并重复使用。

(3)产品在各种环境下可靠、稳定和耐久。在我们设计并建造要使用 50~100 年的结构所处的各种环境下，系统的主要性能和计算结果都要能保持基本一致。

(4)产品的实用性。便于施工安装；容易理解，和我们工程结构中现有的结构构造接近。

(5)经济性。产品在工程市场竞争中能胜出。

也许，有的人并不完全赞同这个标准，特别是有的教授喜欢对所有的产品全面、平等地作理论介绍，很少作实际应用结果的评述，更不愿去得罪人说明产品的问题，以及他们为什么会被淘汰。其结果是，很多没有时间和机会作深层研究的学生和初级工程师在纷繁芜杂的结构保护系统中无从判断，甚至把国际上早已否认的理念和产品，作为“创新”和“发明”应用在实际工程中。我们想从另一个角度大胆地去讨论该问题，用上述几点衡量一下目前世界上存在的结构保护系统，判断它们的发展应用前途，希望对工程师们有帮助。看看我们要使用的产品是否能用？是否好用？是否经济？是否经得起时间的考验？虽然，所谈到的结构保护系统，并不都是作者经过深入研究的课题，可也让大家知道，在这些问题上，还有这样一些不同的观点存在。作为一个工程师，我们还有不同的考虑。

1.1.1 结构保护系统的发展过程

20 世纪 80 年代末期，在美国、加拿大、日本等国，无论“被动保护系统”和“主动保护系统”以及后来诞生的“半主动保护系统”都有了很大的发展，开始有人把这一理论引入到我们土木工程界，经过了一个“百花齐放”的广泛发展阶段。在这个时期的最初几年内，有很多新的想法诞生，新的“装置”被试用。专业工程师喜欢用图 1.1.1 来说明这一阶段的发展。

在结构保护系统的发展史上，考虑到大量地震工程的应用，这些“新”想法中一部分被从事实际工程的结构工程师们认为不适用或时机尚不成熟，很快被质疑。结构的主动和半主动抗

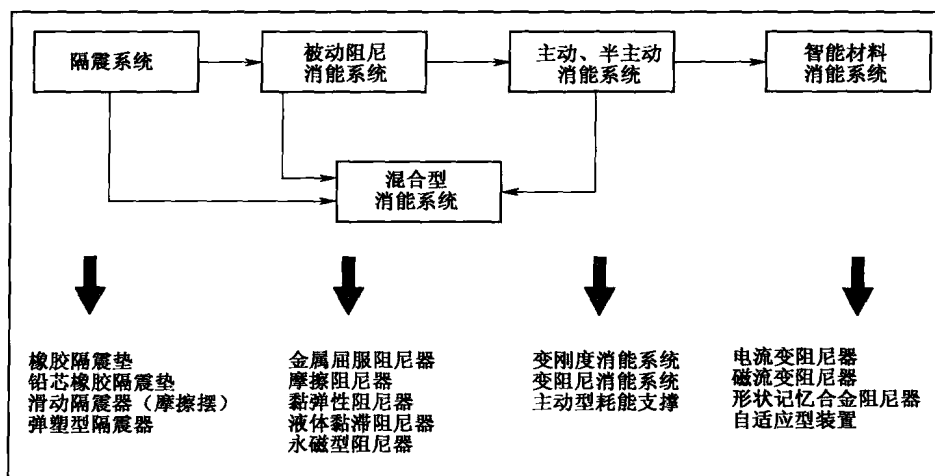


图 1.1.1 结构的保护系统

震保护系统发展的困难就基于这个原因；有的产品只要经过简单的试验，当然也有的做过大量实际测试后，被结构工程师们认为有严重缺欠、不能满足工程要求而被列入待发展的行列，金属摩擦阻尼器，材料性黏弹性阻尼器等都属这类产品。他们不仅经历了大量试验，还在美国、日本、加拿大、新西兰等国做过几个甚至十几个工程后最终被否定；当然，也有很多的产品因各种问题，自知无前途，生产厂家将产品转型、兼并或已经破产。经过 20 年的肯定和淘汰，在各种工程事故、抗震、抗风的检验，工程师们的反思，世界工程界已经用“应用”作为选票，用事实说明，在美国已经有了较一致的看法。本文将分别介绍这些常被提到的结构保护装置的成功和问题所在。

到了 20 世纪 90 年代中期，工程师们希望对这些“百花齐放”的结果作一个鉴定，希望有人能正确地告诉他们“能否使用”和“是否好用”，当然最希望的是让试验和工程说话。美国由官方(NSF——美国国家科学基金会)或半官方(ASCE——美国土木工程学会)出面组织了两次非常重要，也非常经典的联合鉴定测试。更有代表性的应该是美国土木工程协会(ASCE)组织的 HITEC(美国高速公路创新技术评估中心)的联合测试。测试是在上述前期理论推导和振动台理念试验的基础之上进行的。工程师们选择了已经做了大量振动台研究试验，从概念上得到肯定的基础隔震和液体黏滞阻尼器两类产品进行预检测。世界上最先进的 11 个生产厂家的产品被邀请参与了这一测试，其中 8 个为基础隔震产品，包括铅芯橡胶垫隔振垫、摩擦摆隔震垫，3 个为液体黏滞阻尼器。测试由第三方组成的一个专门小组领导。当时，所有要想进入市场的产品都需要经过这一预检测。测试的结果是对产品的鉴定，也给了工程师们一个可以信赖的数据依据。

测试内容包括：

- (1) 基本性能检验/时变性测试(Performance Benchmark)；
- (2) 频率相关性测试(Frequency Dependent Characterization)；
- (3) 疲劳及磨损测试(Fatigue and Wear)；
- (4) 环境老化测试(Environment Aging)；
- (5) 极限温度下的动力测试(Performance at Temperature Extremes)；
- (6) 耐久性测试(Durability Test)；
- (7) 超载测试(Ultimate Performance)。

再不了解情况的人也会想到,这些试验对新技术的推广和应用是个重要的鉴定和确认。请注意,这些测试不是为了说明基础隔震和阻尼器在建筑和桥梁结构中使用的效果,这一效果早已在这些试验之前的振动台模型测试中得到肯定,并在后来作为一个特殊单元被编制在 SAP2000 和 ETABS 等结构计算机程序之中。与此不同,美国土木工程学会规定的这些试验内容就是为了鉴定我们测试的这些装置本身,看它是否能在我们土木工程会遇到的各种环境下正确工作。是否能满足我们土木工程所要求的可靠性和稳定性。还有一点很有趣,这是个由官方或半官方组织的、所有生产厂家退出的专家鉴定小组。在试验报告中,只是客观写出试验的结果,并不作任何结论。就连在超载试验以前就已经早早破坏了的美国 ENIDINE 的阻尼器,他们也不去下什么结论。然而,对于细心的使用者说来,这些试验结果就已经完全说明问题了。

工程师们都十分肯定并相信这一测试内容,所有相关的美国规范规程包括 FEMA(Federal Emergency Management Agency——联邦紧急管理局)、AASHTO(桥梁设计规程)、ASCE 都把通过这一测试作为其产品可以应用的前提条件。在这之后,任何想进入美国市场的相关产品如果没有做过 HITEC 测试的,也都希望按它的测试过程自己或请人测试一遍,实际上这已经成为了工程师们选用基础隔震和阻尼器等的试金石。其他结构保护产品也完全可以按照上述测试内容,自己组织一套相应试验,这应该是起码的要求。

在这次试验完成、美国相应规范规程肯定以后,“结构的保护系统”才正式大张旗鼓地进入到实际工程领域。越来越多的世界上重要的建筑和桥梁工程,用上了世界上效果最好、最可靠、最耐久的结构保护产品。实际证明了,也将不断证明。只有确保质量,才能真正被广大工程师们真正接受,才可能为结构保护系统带来长期的发展和广泛的应用。

即便至此,结构保护系统的发展并不是已经结束。最近美国 Constantinou 教授在美国科学基金会和美加州交通部等单位要求和资助下完成了“在日常运营及地震作用下结构抗震保护装置的性能表现”的研究总结,对这 20 多年来结构保护系统的发展作了系统地盘点和总结归纳。值得说明的是,他们的侧重和研究的目的不是理论的完整和先进性,而是工程中应用的相关问题。结构保护系统全部发展过程,可以用图 1.1.2 概述。

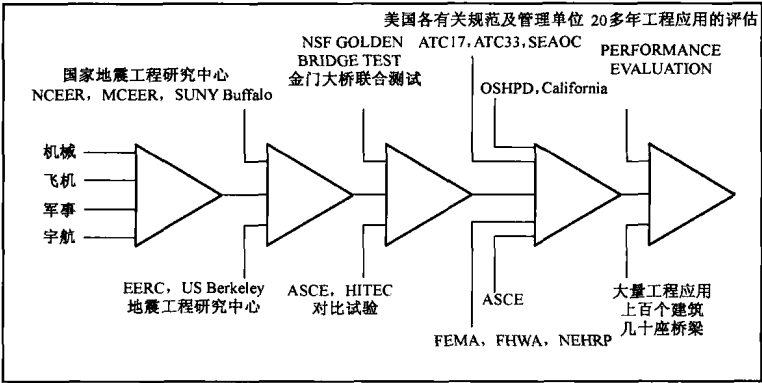


图 1.1.2 结构保护系统发展过程

在经过一个快速的发展阶段后,相对而言,美国地震工程师们已经不再热衷于建立新的想法和研发新的装置,而是更重视提高其使用功能的可靠性、稳定性和如何扩大其应用范围。经过近 10 年的淘汰发展,在美国被工程界所认可的理念和先进的产品有:液体黏滞阻尼器所构成的耗能减振系统;结构基础隔振系统,特别是摩擦摆隔振系统;以及首创于日本并得到美国

工程界认可的屈服约束支撑(UBB, BRB)系统。

阻尼器一经使用,就显现出巨大的作用。最初几年,还没有相应的设计规范和精确的计算方法,它只是作为一种附加的保护措施在工程中应用。随着计算方法、规范和各种试验、检验技术的完善,及在实际地震中的观察和测试,阻尼器已经完全被人们所接受。阻尼器的使用也从锦上添花的第二防线(大震时发挥作用)发展成为结构构件的一部分,替代传统的结构构件参与结构的分析。除此,使用阻尼器还可能会大大减少结构造价。所以,我们可以肯定地说,“结构的保护系统”是 20 世纪人们在结构抗振动能力提高的研究中最显著的成果。

利用阻尼器来吸能减震不是什么新技术,在航天航空、军工、枪炮、汽车等行业中早已应用各种各样的阻尼器来减振消能。从 20 世纪 70 年代后,人们开始逐步地把这些技术转用到建筑、桥梁、铁路等工程中,其发展十分迅速。

简单地说,使自由振动衰减的各种摩擦力和其他阻碍力,我们称之为阻尼。而安置在结构系统上的可以提供运动阻力、耗减运动能量的“特殊”构件,我们称之为阻尼器。

我们早已经熟悉汽车、大炮、电梯间上使用的减振器,如果把它们进行数学模型化,应用到结构工程上,同样可以达到结构减振的目的。传统的结构动力方程可以写成:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + F_D(\dot{u}) = F(t) \quad (1.1.1)$$

式中 M, K, C ——结构的质量、刚度、阻尼矩阵;

$F(t)$ ——作用力列阵,对于地震作用;

$$F(t) = -M\{1\}\ddot{u}_g$$

$\ddot{u}_g$ ——地面运动加速度时程;

$u, \dot{u}, \ddot{u}$ ——结构的位移、速度和加速度列阵。

当结构处于弹性振动状态,恢复力项 Ku 为弹性;而当结构振动进入弹塑性阶段,则恢复力项 Ku 也呈非线性。 $F_D(\dot{u})$ 为设置阻尼器附加阻尼装置带来的阻尼力列阵,只要处理正确,它总是会使运动减小。如果写出能量方程的形式:

$$E_K + E_D + E_S + E_P = E_I \quad (1.1.2)$$

式中 E_K ——结构的相对动能;

E_D ——结构中的内阻尼引起的耗能;

E_S ——结构的弹性应变能;

E_I ——能量总输入;

E_P ——由被动阻尼器所耗散的能量。

不难理解,能量由于分解成不同振型的单自由度体系的反应而随阻尼比的增大而减少,相应的,其多自由度结构的阻尼比增加,反应也会降低。一般而言,我们很容易通过阻尼器,使多自由度体系的整体阻尼比增加 5%~30%。

可以看出,如果我们能把所熟悉的减振装置精确化、准确化,便可使其成为应用于土木工程中的减振器,我们可以称之为阻尼器或吸能器。

阻尼器可以看成减振器,但它和普通汽车、电梯间、大炮上所安置的减振产品截然不同,对我们结构工程师说来,在其应用中最重要、最关心、也一定要考虑的是以下几方面:

精确性——要求阻尼器不仅能在定性上“减振”,还要求能精确的计算出它的阻尼力。最初阻尼器的使用,只是作为一种锦上添花的抗震措施,基本的结构分析可能并不考虑它。但是,随着阻尼器的使用发展,它已经参与到抗震分析中。也就是说,使用阻尼器可以减少主体结构地震需求,这点已经被工程界和国际上的相关规范所接受。那么,如何确保计算的精确

性,也就成了重要因素。

可靠性——结构要在各种不同的环境下工作,也就要求阻尼器要在各种环境下都保证安全可靠。如:不同温度、天气情况下的可靠。目前看来,阻尼器的可靠性已经成为这项技术能够继续推广和进一步普及的关键所在。

耐久性——即长期工作状态下装置的稳定性,包括疲劳和长期应用下的徐变等影响。

一致性——同一理论要求的阻尼器性能要保持一致,这样可以避免很多不良后果。

上述四项要求,就使得我们选择阻尼器产品时,不能简单的看外形,看一、二次试验的结果。我们一定要从它的材料、设计制造、产品检验、模型和原型振动分析、工程应用、实际地震的考验以及规范和工程界的接受程度等诸多方面来考虑和评价。特别要强调的是,如果没有真正深入了解技术的专家组的鉴定、没有长时间应用的检验就投入使用的阻尼器可能会因漏油、生锈等原因引起失效或部分失效,从而带来很多意想不到的副作用。

1.1.2 液体黏滞阻尼器的耗能技术

本书第2章所讨论的主题就是被称之为液体黏滞阻尼器的减震装置。图1.1.3为美国旧金山海湾大桥上设大型阻尼器的照片。

液体黏滞阻尼器是一种看上去很像车辆减振器的活塞筒状装置。内设硅油,在活塞的往复运动中液体起黏滞作用,耗散地震能量,对结构起到耗能、减振控制作用。这种内置硅油的速度型阻尼器,性能相对可靠稳定,并已经发展成从规范、设计规程到分析计算程序、产品检验的完整的体系。它完全可以满足上述工程中的“应用准则”。其中,最受工程师们

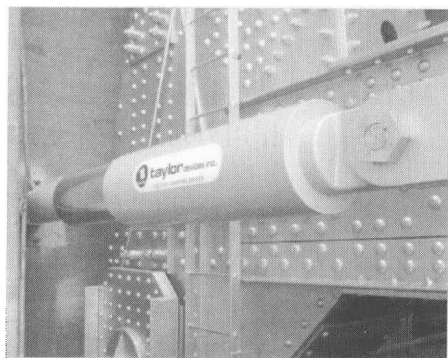


图 1.1.3 美国旧金山海湾大桥上设大型阻尼器

青睐的、世界最好的液体黏滞阻尼器,其产品质量过硬、性能稳定,可以确保35年的免维护。在短短的20多年里,美国和世界各地已经有400多个桥梁和建筑结构上使用了这一产品。

我们也同时要指出的是:结构工程所要求的液体黏滞阻尼器是个技术要求很高的产品,在工作上,它有以下几个要求和特点。

- (1)它应是个准确定量的产品,才能满足我们工程计算的需要。
- (2)它是在可能的高速下工作。在地震作用下,有时高达每秒1~2 m以上。
- (3)在动力超高压下工作,其内压经常高达100 MPa以上。
- (4)要能在各种环境下长期、可靠、稳定的工作,要求与结构同寿命。

实际上,在液体黏滞阻尼器的制造上,有两个大多数生产厂家难于解决的难题:保证液体黏滞阻尼器在长期动力荷载下不漏油;保证液体黏滞阻尼器满足设计参数的要求。

正因为这两个难题,致使国际上的一些液体黏滞阻尼器厂家的产品在质量上频频发生问题,使阻尼器的发展呈现两极。一端是国际上“知名”的阻尼器厂的“破产”(如英国 Colebrand, 法国 Jarret)或“停止生产”(美国 Enidine);另一端是世界最好的阻尼器生产厂在发展和应用上呈明显上升趋势。

当然,它毕竟是在我们传统的结构构件之外加装的一个“外来装置”。了解这个装置的真正作用、找到合适的安装空间、熟悉它的存在、确认它的经济效益、判断在使用上它是否稳定、

耐久、可靠,都是我们建筑、桥梁结构工程师的考虑。

1.1.3 基础隔振技术

用一个允许一定程度运动、可以改变结构周期的隔震装置把地面运动和结构隔离开来,这样可以很好的对结构起到减振和保护作用。最早发展起来、且保持至今不断完善的铅芯橡胶垫的技术在工程减振上得到了成功的应用。美国 Dynamic Isolation Systems Inc. 已经在世界各地为近 300 座桥梁安装了橡胶各种支座。然而,我们仍想指出工程师们在使用时的顾虑和可能发生的问题:有机的橡胶装置在长期工作环境中的真正稳定、耐久性怎么样?日本不是证明了它在温度变化中的性能改变现象吗?在日本所做的较高尺寸橡胶支座上发生折断试验也不能不引起我们的警惕。

金属摆动摩擦支座技术呈现出了快速发展趋势。这种起源于美国地震保护系统公司 Earthquake Protection System (EPS) 的金属型摩擦摆隔震垫 Friction Pendulum Bearing (FPB),与铅芯橡胶垫相比,可以在更广泛的环境下承受更大的垂直荷载、允许更大的水平位移,并能在更长的时间内可靠稳定地工作。看上去,它和传统的桥梁支座差不多,但抗震性能上却有着本质的不同。这种金属摆动摩擦支座受到了工程师的大力欢迎,仅在美国,近几年就已经有 50 多个工程使用了这一产品。图 1.1.4 为美国 Benicia-Martinez 大桥上设置世界最大隔震垫的照片。

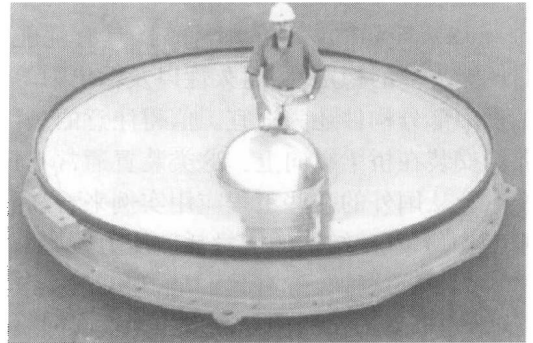


图 1.1.4 美国 Benicia-Martinez 大桥上设置的世界最大隔震垫(40,000 lb, 13 ft)

在隔震系统上配合使用液体黏滞阻尼器不仅可以使结构起到隔震作用,同时也避免了过大的位移,防止橡胶隔震系统的垮塌破坏,这是一个常被采用的合理的设计方案。

目前我国已经大量采用橡胶隔震系统;北京万国城各楼间连廊上安置了我国首例美国 FPB 摩擦摆拉压支座;也在其他工程上安置了我国仿制的抗震 FPB 支座。存在的最大问题是,目前国内具有的垂直压力下能高速水平推进的动力试验设备性能尚有局限。也就是说,我国已经大量应用的隔震系统几乎都没有经过真正符合美国标准的动力测试。正因为测试验收的问题,致使我国南方正在进行的世界最大的基础隔震工程所采用的橡胶垫在安装后发现大量问题,而不得不返工更换。

土耳其高架高速公路上金属隔震支座,因设计和产品的双重问题,在 1999 年 Duzce 7.2 级大地震中严重破坏的案例也应该引起我们基础隔震工程的警惕。

当然,考虑到倾倒危险等问题,各种隔震系统用在高层或超高层建筑上都受到应用局限,也必须解决链接地下管线的空间冲突问题。此外,它毕竟是对传统“牢固基础”的一个观念上的改变。真正全面接受它也要有个长期的适应和发展过程。

1.1.4 防屈曲耗能支撑

由日本 Nippon 公司研究出的防屈曲耗能支撑(Buckling-Restrained Brace),也常被称为无黏结支撑(Unbonded Brace)、屈曲约束支撑(Buckling-Restrained Brace),或简称 UBB、

BRB。这种新型耗能装置也是在结构工程师早已熟悉的结构支撑构件的基础上改进发明而来的。它在普通金属支撑上加上软钢芯和可靠的保护层,在强烈地震中软钢可以率先屈服,起到屈服耗能作用,软钢外设的保护装置将屈服约束在软钢上,对整个系统和结构具有很好的保护效果。这种位移型阻尼器,是在美国本土之外发明而又得到了美国工程界认同的好产品。美国本土也有两家公司购买了日本 Nippon 公司的专利,开始并大量生产防屈曲耗能支撑(STAR SEISMIC, LLC 和 CoreBrace, LLC)。图 1.1.5 为正在安装中的防屈曲支撑的照片。

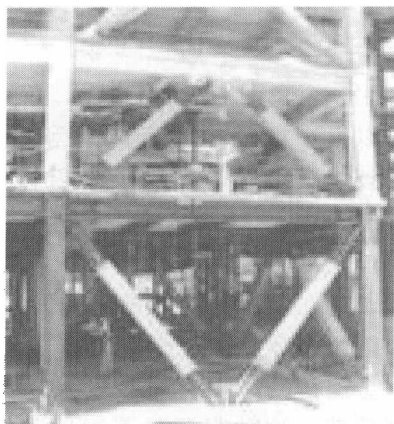


图 1.1.5 正在安装中的防屈曲支撑

在各种各样的结构保护系统中,对于能量耗散装置(Energy Dissipation Devices)而言,具有耗能能力的防屈曲耗能支撑的稳定性、耐久性以及输出力等级对于桥梁工程中部分构件还为适宜。值得注意的是,金属屈曲约束支撑并不适合像我们平常所知道的那样安装在桥梁纵向上。这类装置通常不具有足够的位移能力,且会阻止结构因温度而产生变形。从国外的一些工程应用实例来看,屈曲约束支撑适合用于钢结构的桥墩结构中来增大刚度、力和基础结构的能量耗散能力,这是一种在桥梁抗震领域具有一定应用前景的新型耗能材料。尽管这种装置有其不足,它不仅会改变结构原设计的周期,还可能引起地震荷载的加大;给结构带来的长期往复抗震能力也有限。但它在传统建筑上的形式上的改变很少,应该容易被结构工程师在建筑结构上接受,应该有一定的前景。

要强调一点是,在美国、日本等抗震研究先进的国家,基本上没有人出来说“什么产品不好,什么产品不能用”,而是通过规范肯定好的产品。通过“不去”应用,淘汰不成熟的产品。给设计人员明确的指导,也给不成熟的产品留下发展改进的余地。作为我们后来启动的研究者,首先要了解他们为什么肯定以上三种产品,也更要了解为什么有的产品被淘汰或需要进一步的工作。当然,结构保护系统的其他的产品从来没有停止过发展,新的理念和产品层出不穷,笔者的看法是:要想真正发展并广泛应用某一产品,应该首先要看看过去做过的试验、工程教训。也更要看大家公认的缺欠问题是否已经被解决。无论新的产品和重新启用的老产品,都应该作过类似上述 HITEC 试验的鉴定,并有满意的结果。

1.2 体系的阻尼和能量分配

使自由振动振幅稳定的减小的作用称为阻尼。在传统结构中,阻尼通常采用几种不同的能量耗散机制共同引起,如结构在振动过程中由于材料内部之间摩擦产生的耗能,各构件接触面以及结构与支撑面间的摩擦,结构基础与土体之间的摩擦,空气阻力等等,均可视为阻尼的不同来源。

通常,为了便于数学上的表达,经常把这些阻尼理想化为阻尼力的大小与质点的速度成正比的黏性阻尼形式,其方向与运动的方向相反,这使结构的振动方程大大简化,可采用下式进行表述:

$$F_D = C\dot{X} \quad (1.2.1)$$

式中 C ——阻尼常数;