

东南土木

青年教师

科研论丛

智能预应力技术 ——探索与试验

徐伟炜 著

Smart Prestressing Technology

——Exploration and Experiment

东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

智能预应力技术

——探索与试验

徐伟炜 著

中央高校基本科研业务费专项资金资助

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 提 要

本书主要结合国家自然科学基金项目(51208094)和江苏省自然科学基金项目(BK2012342)的研究工作,在传统预应力技术的基础上探索智能预应力技术,以期为桥梁结构的挠度控制和其他工程结构的应力、变形控制提供新的重要途径。本书共分7章,内容包括绪论、智能预应力梁的力学分析、智能预应力梁的有限元参数化分析、移动质量作用下智能梁的挠度控制、智能预应力系统的组成、智能预应力结构控制试验、智能预应力技术展望与应用设想。

本书可供结构工程、桥梁工程专业的教师、研究生和高年级本科生使用,也可供从事预应力技术领域的科研人员、工程技术人员与管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能预应力技术:探索与试验/徐伟炜著. —南京:东南大学出版社, 2015. 6

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-5704-3

I. ①智… II. ①徐… III. ①预应力技术
IV. ①TU757.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 089447 号

智能预应力技术——探索与试验

著 者 徐伟炜

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d.d.00@163.com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼2号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 兴化印刷有限责任公司

版 次 2015年6月第1版

印 次 2015年6月第1次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 8.5

字 数 207千

书 号 ISBN 978-7-5641-5704-3

定 价 38.00元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有許多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学

者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

恰逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吕志涛

2013.12.23.

前 言

近年来,我国铁路事业飞速发展,主干线已连续几次进行全面提速,新建线路设计时速不断攀高,高速铁路建设正加快推进。列车运行速度的提高对轨道平顺性提出了更高的要求,无论是提速加固原有桥梁还是新建预应力混凝土桥梁,控制其长期弯曲变形成了设计的最主要原则之一,桥梁在长期恒载作用下的徐变变形直接影响轨道结构的受力、平顺性和行车安全。为减小恒载内力,现有技术手段之一是施加预应力。

传统预应力技术,是采用人为方法在结构中预先引入与荷载效应相反的应力,以提高结构承载能力、改善结构的受力状态,从而达到节约材料、减轻自重等目的。但是,当活载变化幅度相对于恒载而言较大时,结构中将存在高应力状态。在长期高应力状态下,混凝土容易产生较大的徐变,从而导致结构出现较大变形,影响结构正常使用。

智能预应力技术,能够根据结构状态调整索力,明显改善预应力的效果,能避免长期不良应力和大大减少与时间紧密相关的预应力损失,使结构具有自适应性能,从而有效地控制短期挠度以及长期徐变效应,提高轨道的平整度和行车的安全舒适性,具有前瞻性和重要的现实意义。

本书结合国内外智能结构及预应力结构的研究现状,本着以基础性研究为主,从应用着眼的指导思想,探索性地开展智能预应力技术的研究工作,主要内容包括绪论、智能预应力梁的力学分析、智能预应力梁的有限元参数化分析、移动质量作用下智能梁的挠度控制、智能预应力系统的组成、智能预应力结构控制试验、智能预应力技术展望与应用设想。

本书从选题之初,到试验方案制定,以及书稿的撰写完成,得到了导师吕志涛院士的悉心指导,在此表示诚挚的感谢。同时感谢东南大学自动化学院马旭东教授、赵亚明硕士,机械工程学院任祖平教授、毛玉良副教授,电工电子实验中心胡仁杰教授,以及东华测试技术有限公司的技术人员,试验的最终完成离不开他们的热心指导和无私帮助。

由于作者水平有限,时间较为仓促,书中存在不妥之处,敬请读者批评指正。

徐伟炜

2015年1月于东南大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 预应力技术发展简要回顾	1
1.1.1 预应力混凝土结构	1
1.1.2 预应力钢结构	3
1.2 智能预应力原理	6
1.3 国内外智能预应力研究现状	7
1.3.1 国外智能预应力研究现状	8
1.3.2 国内智能预应力研究现状	11
1.4 智能预应力的应用前景	12
1.5 本书主要研究内容	12
第二章 智能预应力梁的力学分析	14
2.1 体内无粘结智能预应力简支梁	14
2.1.1 力学模型	14
2.1.2 控制微分方程的求解	17
2.1.3 算例分析	18
2.2 体外横张智能预应力简支梁	22
2.2.1 力学模型	22
2.2.2 不考虑速度条件时的系统过程分析	23
2.2.3 考虑速度条件时的系统可控性分析	25
2.2.4 数值算例	26
第三章 智能预应力梁的有限元参数化分析	29
3.1 横张智能预应力梁的有限元分析方法	29
3.1.1 索的有限元方程	30
3.1.2 索对梁的作用	30
3.1.3 梁的有限元方程	31
3.1.4 非线性有限元方程组的求解	34
3.1.5 结构的优化	36

3.2 双撑杆横张智能预应力梁的参数分析	41
3.2.1 力学模型	41
3.2.2 模型参数分析	42
3.2.3 有限元优化	50
3.2.4 移动荷载的仿真	53
第四章 移动质量作用下智能梁的挠度控制	57
4.1 力学模型	57
4.2 多级控制算法	59
4.3 仿真算例	60
4.3.1 无控制算例	60
4.3.2 单级控制算例	61
4.3.3 多级控制算例	61
4.4 参数分析	62
4.4.1 参数效应	63
4.4.2 参数可行域	64
第五章 智能预应力系统的组成	68
5.1 智能预应力控制硬件	68
5.1.1 传感器	68
5.1.2 控制器	71
5.1.3 作动器	73
5.2 智能预应力控制算法	76
5.2.1 传统控制算法	76
5.2.2 现代控制算法	77
5.2.3 智能控制算法	80
5.2.4 控制算法小结	82
第六章 智能预应力结构控制试验	84
6.1 智能预应力梁桥挠度控制试验	84
6.1.1 模型简介	84
6.1.2 静载试验	86
6.1.3 移动加载试验	86
6.1.4 试验结论	87
6.2 智能斜拉桥应力控制试验	87
6.2.1 模型设计	87

6.2.2 模型制作.....	91
6.2.3 静载试验.....	93
6.2.4 移动加载试验	108
第七章 智能预应力技术展望与应用设想.....	114
7.1 智能预应力技术应用设想	114
7.1.1 在装配式钢桁梁中的应用设想	114
7.1.2 在基础托换中的应用设想	114
7.1.3 在锚杆支护中的应用设想	115
7.1.4 在荷载缓和体系中的应用设想	116
7.1.5 在迁移工程中的应用设想	118
7.2 需要继续研究的问题	119
参考文献.....	120

第一章 绪 论

1.1 预应力技术发展简要回顾

1.1.1 预应力混凝土结构^[1~4]

混凝土材料的使用已有悠久的历史,古罗马人早就懂得把石头、沙子和一种在维苏威火山地区发现的粉尘物与水混合制成混凝土,这种历史上最古老的混凝土使古罗马人建造了像万神庙穹顶这样的建筑奇迹。然而,由于混凝土在强度上的局限性和加工上的复杂性,它未能得到普及。

混凝土材料虽然在 2 000 多年以前就开始使用,然而现代意义上的混凝土直到 19 世纪才出现。1824 年,英国人 J. Aspdin 发明了波兰特水泥,大大增强了这种材料的强度。1848 年,法国人又发明了钢筋混凝土,增强了混凝土材料的抗拉性能,开辟了混凝土材料更广泛的应用领域。

一般来说,混凝土的抗拉强度约为抗压强度的 $1/6 \sim 1/20$,其极限拉应变也仅为极限压应变的 $1/15 \sim 1/20$ 。因此,混凝土在结构中基本上用于承受压力,而结构中的拉力主要由钢筋来承受,在设计中的许多情况下都完全不计算混凝土的抗拉能力。在正常使用荷载作用下,当普通钢筋混凝土结构中的钢筋应力达到 $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ 时,混凝土就已经开裂了。混凝土开裂,将显著地降低结构的刚度,并会导致钢筋的锈蚀,使结构物变形不断增大。

1) 早期预应力混凝土结构

在古代,人们就发现:木桶干燥时用几道竹箍箍紧,盛水后,木材膨胀受到竹箍的约束,接缝被挤紧,木桶就不会漏水;张紧的锯条,可使薄薄的锯条在锯木头时,不发生翘曲。

1866 年,美国工程师 P. H. Jackson 首次将这种原理嫁接到混凝土结构中,以期避免混凝土结构裂缝的出现;1908 年,美国工程师 C. R. Steiner 提出收缩徐变发生后,再张拉预应力筋,以期降低结构中的预应力损失。然而,由于采用低强度钢筋产生的有效预应力与锚固损失和混凝土收缩徐变产生的损失几乎相互抵消,因此这些方法没能在工程中应用推广。直到 1928 年,法国工程师 Eugene Freyssinet 发觉到混凝土徐变的重要性,并利用高强度预应力钢材来减少预应力的最终损失,才使得预应力混凝土进入了实用阶段。

2) 全预应力混凝土结构

早期的预应力混凝土都是按照全预应力混凝土来设计的。根据当时的认识,预应力的目的只是为了用混凝土承受的预压应力来抵消使用荷载引起的混凝土拉应力。混凝土不受拉,当然就不会出现裂缝。这种在全部使用荷载作用下必须保持全截面受压的设计,通常称为全预应力设计,“零应力”或“无拉应力”则为全预应力混凝土的设计基本准则。

全预应力混凝土虽然具有抗裂性好、刚度大等优点,但在预应力结构的实践中也发现有一些严重的缺点,主要有以下几个方面:

(1) 在全预应力混凝土构件中,纵向预应力钢筋的用量往往较大,且张拉控制应力的取值较高。因此,对张拉设备以及锚具的要求较高,费用也较大。在张拉或放松预应力钢筋时,锚具下混凝土受到较大的局部压力,所需的钢筋网片数量较多。

(2) 在制作、运输、堆放、安装过程中,截面的预拉区往往会开裂,以致需在预拉区亦设置预应力钢筋。

(3) 全预应力混凝土构件反拱长期不断发展。在恒载大而活载小的结构中,反拱一般是不大的,但在恒载小而活载大,特别是在活载最大值很少出现而长期持续作用值较小的情况下,预压区混凝土由于长期处于高压应力状态会引起徐变和反拱的不断增长,影响正常使用。

3) 部分预应力混凝土结构

1940—1942年,P. W. Abeles提出了在使用荷载下混凝土允许出现拉应力或细微裂缝的所谓部分预应力混凝土。1944年后,英国铁路部门修建了部分预应力混凝土铁路桥梁。部分预应力混凝土的出现,遭到了 Freyssinet 的强烈反对,他认为在全预应力混凝土和普通钢筋混凝土之间不存在具有更好性能的折中方案。由于 Freyssinet 的反对,阻碍了部分预应力混凝土在工程上的应用,然而却促进了人们对预应力混凝土开裂后性能的深入研究,加深了对部分预应力混凝土的了解,促进了部分预应力混凝土的发展。1954年在英国召开的纪念 Freyssinet 首创预应力混凝土的会议上,Freyssinet 改变了自己的看法,同意部分预应力混凝土的推广应用。此后部分预应力混凝土得到了较迅速的发展。1962年在罗马召开的欧洲混凝土委员会和国际预应力混凝土协会(简称 CEB-FIP)联合会议上,讨论了降低预应力混凝土结构抗裂性能要求的可靠度及预应力混凝土构件是否可以带裂缝工作的问题,首次提出了将预应力混凝土和钢筋混凝土之间的中间状态连贯起来的设计思想。直到1970年在布拉格召开的 CEB-FIP 会议上,进一步将加筋混凝土按预应力程度分为四类,并列入《混凝土结构设计施工建议》中,从而确定了部分预应力混凝土结构在加筋混凝土结构中的地位。

部分预应力混凝土的引入,填补了普通钢筋混凝土与全预应力混凝土之间的空白,虽然这并不是对混凝土本质的改革,不会使设计和施工过程发生原则性的变化,但却为混凝土结构的设计和构造带来更大的选择性,设计者可以根据对结构功能的要求和所处的环境条件,合理选用预应力度,以求得使用性能好、造价低的最优结构设计方案。这是加筋混凝土设计思想上的一大发展。

在加钢筋混凝土系列中,部分预应力混凝土是介于全预应力混凝土和钢筋混凝土之间的,与全预应力混凝土和钢筋混凝土相比有以下的优点:

(1) 与全预应力混凝土比较,节省高强预应力钢材。部分预应力混凝土所施加的预压力较小,因此,所需的高强预应力钢材用量也较少。

(2) 部分预应力混凝土由于所需预应力筋较少,因此,制孔、灌浆、锚固等工作量少,梁端部的锚具也易于布置,总造价相应较低。

(3) 可以避免过大的预应力反拱度。预应力的降低有效地控制了由于高压应力造成的反拱不断发展的现象。

(4) 提高了结构的延性。与全预应力混凝土相比,由于配置了非预应力普通受力钢筋,提高了结构的延性和反复荷载作用下结构的能量耗散能力,有利于结构的抗震、抗爆。

(5) 可以合理控制裂缝。与钢筋混凝土相比,在正常使用状态下,部分预应力混凝土结构一般是不出现裂缝的,即使在偶然最大荷载出现时,混凝土梁体开裂,但当荷载移去后,裂缝就能很快闭合。

部分预应力混凝土的缺点是:与全预应力混凝土相比,抗裂性略低,刚度较小,以及设计计算略为复杂;与钢筋混凝土相比,则所需的预应力工艺复杂。

预应力混凝土结构的发展包含着否定之否定的辩证发展规律,从钢筋混凝土发展到全预应力混凝土是一次否定,它使得高强钢材与高强混凝土得到了协调使用,全预应力混凝土提高了结构的刚度,并且改善了混凝土结构的抗裂性能,在很大程度上解决了大跨度结构中应用混凝土构件的问题。从全预应力混凝土发展到部分预应力混凝土又是一次否定,部分预应力混凝土克服了全预应力混凝土长期处于高压应力状态、受徐变影响大、构件的反拱度大等缺点,同时适度解决了构件端部锚具过于集中的问题。部分预应力混凝土结构设置一定数量的普通钢筋,还可提高构件的延性,更有利于在地震区域的应用。但是部分预应力混凝土不可能替代全预应力混凝土,它们分别适用于不同的环境与工作条件要求,有些工作环境必须要使用全预应力混凝土结构。总之,部分预应力混凝土不是简单地替代全预应力混凝土,而是其自身的完善与提高。

近年来,随着材料科学的发展,具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳、热胀小等优点的 FRP 材料,以及具有强度高、流动性好、密实性高、耐久性好等优点的高性能混凝土材料逐渐被应用到预应力混凝土结构中,成为国内外学者研究的热点之一。

1.1.2 预应力钢结构^[5~11]

钢结构的发展,从所用材料看,先是铸铁、锻铁,后是钢;从连接方式看,在生铁和熟铁时代是销钉连接,而后是铆钉连接、焊接连接,最近则发展了高强螺栓连接、焊接球节点连接及铸钢节点连接;从结构形式看,桥梁、塔,工业及民用房屋和水工结构等工程中都有应用,最近几年,则在大量公共建筑中有广泛应有。

1) 国外预应力钢结构

在国外,19 世纪的工业革命促使科学技术飞速发展。生铁材料出现以后引起了建筑结

构革命性的变化。1787 年英国出现机轧熟铁条,1831 年英国又机轧出角铁,1845 年法国人碾压出熟铁工字钢。当时铁价比木材低廉,采用铁骨架设方便,又具有杆件截面小、能防火等优点,一改砖石结构笨重的形象,使人有一种轻巧灵活的感觉,因此欧洲大陆兴起了铁建筑热潮。1851 年在伦敦海德公园举行首届国际博览会的展览馆水晶宫是完全用铁材和玻璃建造的第一栋铁结构房屋。1856 年英国人 H. Bessemer 首次用转炉炼钢成功,钢材开始用于建筑结构。而后出现了轧制型钢和铆钉连接的方法,钢结构得到了广泛应用。

在 Freyssinet 发明了预应力混凝土后,人们又将预应力技术引入到钢结构中,使结构控制截面产生的预加应力与设计荷载产生的应力符号相反,以提高结构的承载能力,减小其变形,达到节约钢材、降低造价的目的。预应力钢结构和预应力混凝土结构在概念上有不同之处。在混凝土结构中施加预应力的目的主要是克服混凝土抗拉强度低、容易开裂以及无法利用高强钢材的缺点;而在钢结构中施加预应力,主要是为了充分利用钢材弹性范围内强度,使钢结构在相同的材料消耗时,改善结构受力性能,提高其承载能力和刚度。与普通钢结构相比,预应力钢结构具有如下优点:

- (1) 充分利用材料的强度潜力,以节约钢材。
- (2) 改善结构的受力状态,以提高结构的承载力。
- (3) 提高结构的刚度、稳定性及疲劳强度,调整其动力性能。

预应力钢结构技术最早出现在 19 世纪末。1897 年俄国人茹霍夫设计的莫斯科百货商场屋盖结构采用了预应力形式,这是世界上最早的预应力钢结构之一。1935 年德国 Dischinger 教授首先提出在钢桥中采用高强度钢索施加预应力的方法。在随后的几十年中,欧美及苏联等国家对预应力钢结构进行了广泛的研究,并进行了大量的工程实践活动,如:1948 年苏联的工程师伐霍尔金等建成了一座预应力跨路钢桥;1949 年苏联科学技术副博士格依达罗夫进行了双槽钢组成的箱形截面施加预应力的试验,并证明了钢结构中采用预应力可节省钢材的优点;比利时 Magnel 教授也为预应力技术在钢结构中的应用做出了很大的贡献,1950 年他主持了一个跨度为 14.33 m 的预应力钢桁架试验研究,引起了工程技术界的极大关注,1953 年, Magnel 教授又在研究和试验的基础上建立了布鲁塞尔机库大门的预应力双跨连续钢桁架,同年在美国建成了著名的雷里竞技场。1963 年,苏联功勋科学家 E. H. Bejehr 教授出版了专著《预应力承重金属结构》,为预应力钢结构学科的全面发展奠定了基础。随着研究的不断深入,预应力钢结构学科得到了大大的丰富和提高,并且日益系统化和全面化。

20 世纪七八十年代是预应力钢结构蓬勃发展的时期。由于通常意义的结构形式已经不能很好地胜任当时人们对建筑物尤其是大型公共建筑物的覆盖面积及空间造型等各方面的要求,而预应力钢结构逐渐以其卓越的功能性和经济性引起了人们的关注,各国都致力于对预应力钢结构形式的研究和建设。随着计算机技术的广泛使用和各种新型空间结构的发展,出现了拉索预应力网架、拉索预应力网壳、吊挂结构、张弦结构及弦支穹顶等多种新型的结构形式,此时的结构理论得到了空前的发展,一些美妙的设计构想也在人们的探索和尝试下获得了成功,同时越来越多的工程实践都证明了预应力钢结构是一种先进的、可靠的、充

满活力的结构形式。

2) 国内预应力钢结构

在国内,钢结构的应用最早可以追溯到公元前 200 多年秦始皇时代用铁材建造的桥墩。公元 60 年左右,汉明帝时代建造了铁链悬索桥。山东济宁铁塔寺和江苏镇江甘露寺的铁塔也是很古老的建筑。然而,现代意义上的钢结构则是在国外的技术传入我国以后才出现的,如 1927 年建成的沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房,1931 年建成的广州中山纪念堂钢结构圆屋顶,1937 年建成的钱塘江大桥,等等。

新中国成立后,我国钢结构的应用日益扩大,但预应力钢结构的发展则始于 20 世纪 50 年代后期。1959 年的山西大同煤矿四老沟矿的输煤栈桥是我国第一座预应力钢结构构筑物,这也揭开了我国预应力钢结构实践发展的序幕。1961 年建成的北京工人体育馆,其屋盖为圆形平面,直径 94 m,采用车辐式双层悬索体系,由钢筋混凝土圈梁、中央钢环梁及辐射布置的 72 根上索和 72 根下索组成。1967 年建成的浙江人民体育馆,其屋盖为椭圆平面,长径 80 m,短径 60 m,采用双曲抛物面正交索网结构。

但此后预应力钢结构的发展由于受到政治、经济等因素的影响,停顿了较长一段时期,直到 1980 年建成了成都城北体育馆。它的圆形屋盖直径为 61 m,也采用了车辐式双层悬索结构,但在构造上做了一些改进。尽管存在如上介绍的几个杰出工程,但回顾 20 世纪 80 年代前的发展情况,必须承认当时的总体水平仍然是比较落后的,同国际发展的水平相比差距较大。

从 1996 年起,我国钢的年产量开始超过 1 亿 t,一跃成为世界之首。1997 年 11 月,建设部发布了《中国建筑技术政策(1996—2010)》,提出大力推广应用钢结构,这在我国还是第一次,实际上就是将“节约用钢”的政策转变为“合理用钢”的政策。预应力钢结构进入了一个快速发展期,工程实践的数量有较大增长,结构的应用形式趋向多样化,理论研究也逐渐深入化。1993 年我国设计的新加坡港务局仓库预应力斜拉网架,是平面尺寸为 $120\text{ m} \times 90\text{ m}$ 和 $90\text{ m} \times 70\text{ m}$ 的斜拉索吊挂平板网架结构;1996 年初竣工的北京西客站,主站房采用了 4 榀 45 m 跨的预应力钢桁架和 10 榀 28.8 m 跨的次桁架结构体系,承担了 54 000 kN 的门楼荷载;1997 年建成的上海浦东国际机场候机楼是我国首次将张弦梁结构应用于超大跨空间结构中,其最大跨度达 82.6 m;2001 年建成的深圳游泳跳水馆,是由 4 根桅杆吊挂立体桁架梁系屋盖结构,覆盖面积为 $120\text{ m} \times 80\text{ m}$;2003 年建成的广州国际会议展览中心,在屋盖体系中采用张弦梁结构,其最大跨度达 126.5 m,同年建成的哈尔滨会展中心张弦桁架结构,平面尺寸为 $510\text{ m} \times 138\text{ m}$,由 35 榀预应力张弦桁架组成,单榀桁架的跨度达到了 128 m。

鉴于目前大型空间钢结构用钢量仍然偏大的现状,国内外的学者开展了如下几方面的研究:①结构类型的创新;②结构体系的优化;③新材料的应用;④多次预应力甚至智能预应力的研究。在 21 世纪,预应力钢结构作为一种方兴未艾的结构形式必将会获得更深更广泛的应用。

1.2 智能预应力原理

预应力是利用内力的改性或迁移来提高结构承载性能的一种技术,其主要机理如下:

1) 力的重复

利用预应力技术引入与杆件荷载应力符号相反的预应力,因而改变杆件受荷载前的应力场,扩大材料弹性受力幅度,或是多次引入预应力,反复利用材料弹性范围内的抗拉、抗压幅值,通过荷载与预应力产生内力的幅值抵消与反复作用,使结构承载力得到提高(见图 1.1)。

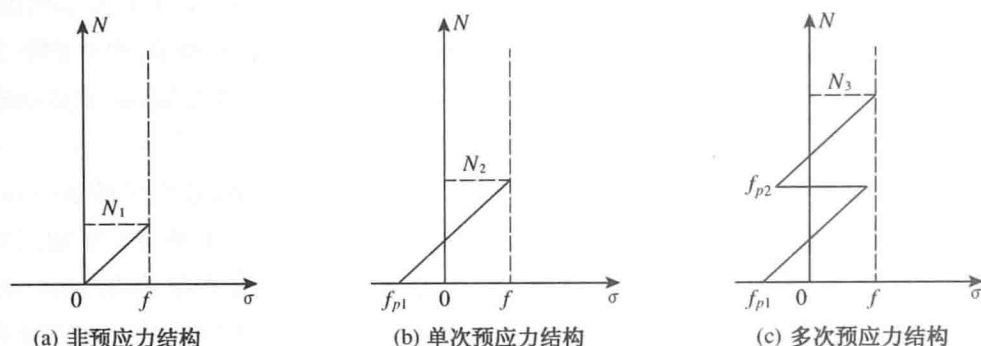


图 1.1 结构承载力的比较

2) 力的转移

施加预应力过程中,将部分由普通钢杆件承担的内力转移到高强材料中去,从而充分利用高强材料的强度幅值,扩大高强材料的应用范围,降低结构的自重和成本。

3) 力的质变

利用预应力可以降低结构的弯矩内力峰值,减小某些杆件的轴力,从而改善结构的内力质量,实现力的改性和质变,达到节约材料的目的。

在结构体系中,如能巧妙利用上述预应力机理,就可形成受力合理的高效结构体系,不仅承载力高,刚度大,而且能使各种构件的材料强度均得到很好的发挥。

根据预应力张拉次数的不同,可将预应力分为单次预应力和多次预应力:单次预应力是在全部加载过程中只对结构施加一次预应力来抵消荷载效应,即一次性地提高结构的承载力;多次预应力是在荷载可以分批施加时,将加载和张拉预应力多次相间进行,即采取“加载—张拉—再加载—再张拉”的循环来抵消荷载效应,多次提高结构的承载力^[12~14]。

与单次预应力相比,多次预应力可根据施工进度逐级张拉,具有多次利用材料弹性强度、降低结构杆件内力、减小结构变形,以及节约材料等优点,而智能预应力更可将多次预应力的这些优点运用到结构的使用过程中。

预应力的施加过程其实是一个结构的优化过程,每施加一次预应力,结构内力就会进行重分布,结构的几何位置也会发生相应变化,从而改善结构构件的内力分配情况。

在使用过程中,结构上作用的外荷载的大小、位置是不断变化的,那么结构能否通过感知外界作用的变化,根据自身的需要,自动调整预应力值,从而达到最大限度地将荷载不利内力形态转换为有利的内力形态,组成以轴压、轴拉为主的先进结构体系呢?这就促使人们产生了智能预应力的新思路:根据结构中的应力、变形自动调整预应力的大小,使结构中的应力、变形控制在设定的范围内,从而将力学意义上“死”的结构转变为具有某些智能特征的“活”的结构。显然,智能预应力是一种实时优化的预应力。

通常,智能预应力结构除了传统预应力结构所需的预应力钢材和锚具之外,还包括硬件系统和软件系统。硬件系统主要是传感器、控制器和作动器。传感器能够感知结构状态的变化;控制器即对结构状态的变化作出反应并给出调整方案;作动器则按照调整方案改变结构的受力状态。三者结合,使结构具有一定的智能,从而主动适应外界作用和内部状态的变化。软件系统主要是控制策略和控制算法。智能预应力系统的组成如图 1.2 所示。

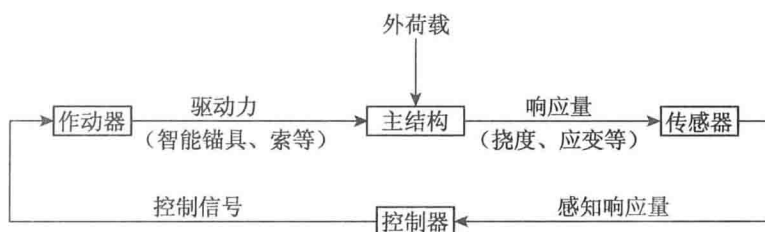


图 1.2 智能预应力系统的组成

智能预应力结构在各种作用和不同的使用环境下,应能够不断熟悉、逐渐适应外界作用及环境的变化,并且对于结构自身在长期作用下的老化、损伤等导致的各种结构性能的变化,能够达到“自检测、自调整、自适应”的功能目标。

1.3 国内外智能预应力研究现状

在土木工程结构中,结构都是按照力学原理来设计的,不能感知外界的作用,更不能对外界的作用自己作出反应以便更好地完成设计任务,因此使用环境变化、材料老化,以及各种难以预测的人为因素,都有可能导致结构的破坏,使人民生命财产受到严重威胁。为了保障结构的安全,设计者常常采用保守设计,增大结构的尺寸与重量,从而增加人力、财力与资源的消耗。

另一方面,在汽车、船舶、飞机、飞船、桥梁、轻质空间结构和军事工程中,存在众多轻质复合材料梁、板、柱,而这些复合材料梁、板、柱在各种荷载作用下,容易发生后屈曲变形,严重影响结构的安全性和可靠性。长期以来,人们梦想将力学意义上“死”的结构转变为具有某些智能特征的“活”的结构。

随着材料科学、信息科学的发展,具有自我感知、自我调整、自我控制、自我适应功能的

智能结构逐渐成为可能。智能结构系统通常包括传感器、控制器和作动器。传感器相当于人的神经系统,能够感知结构状态的变化;控制器相当于人的大脑,能够对结构状态的变化做出反应并给出调整方案;作动器相当于人的肌肉,能够调整结构的状态。这三部分结合、统一、协调,各自发挥特点,使结构具有一定的智能,能够主动地适应周围环境的变化,从而减轻结构因环境变化而产生的反应^[15~17]。

20 世纪 80 年代,智能结构系统及相关智能材料技术首先在航空航天领域展开了研究。90 年代后,美国及西方发达国家开始把注意力转向民用,特别是在土木结构、机械结构振动控制方面,取得了丰硕的研究成果,并且已有部分成果运用到实际工程中,如基于磁流变液的智能阻尼器在房屋结构抗震和大跨桥梁斜拉索的振动控制方面取得了很好的效果。虽然国内这方面的研究起步比国外晚,但在结构的健康监测、振动控制、智能阻尼器研制等方面也取得了很多成果。然而,土木工程结构中的挠度、应力控制研究却很少见到相关的报道。

1.3.1 国外智能预应力研究现状

在结构控制中,目前研究的重点是结构的振动控制与变形控制。变形智能控制及智能预应力是结构控制中非常重要的问题,但由于结构变形主动控制问题的复杂性,该方面的研究刚刚起步。

在结构变形控制中,高性能驱动器是实现智能控制的基础,要求驱动器具有驱动能力强、可回复变形大、响应频率宽等特点。形状记忆合金(Shape Memory Alloy,简称 SMA)的特点是可以实现多种变形形式,可回复变形大,在受限回复时能产生很大的驱动力,抗疲劳性能好,易于同混凝土、钢等结构材料相结合,弹性模量随相变状态的改变而变化等。因此,人们首先结合 SMA 对结构的变形控制展开了研究,如 1997 年 S. DE santis^[18]发表了 SMA 复合材料的结构动态特征的论文;1998 年 Arup K. Maji^[19]发表了基于 SMA 的智能预应力的论文;1998 年 Sup Choi^[20]发表了应用 SMA 的复合梁形状控制的论文;1999 年 P. Gaudenzi^[21]发表了使用 SMA 静态调整梁挠度的论文等。值得一提的是,Arup K. Maji 在智能预应力梁的试验中利用结构的声学特性对其开裂过程进行了监测,试验装置示意图如图 1.3 所示。

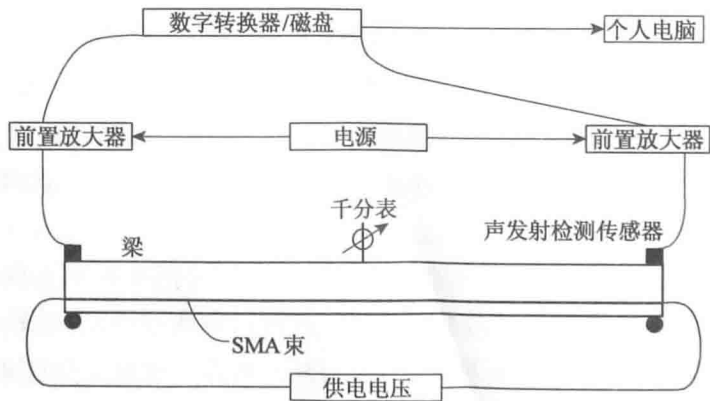


图 1.3 声学测试装置示意图