

新型竖向预应力

钢结构体系拉索参数确定理论

唐柏鉴 顾盛 董军 著



中国建筑工业出版社

新型竖向预应力钢结构体系 拉索参数确定理论

唐柏鉴 顾盛董 董军 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新型竖向预应力钢结构体系拉索参数确定理论/唐柏鉴等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-112-15214-8

I. ①新… II. ①唐… III. ①预应力结构—钢结构—
悬索结构—参数—研究 IV. ①TU394

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 050207 号

本书旨在介绍以拉索参与抗侧为基本特征的新型竖向预应力钢结构其拉索参数的确定准则及方法, 重点介绍了巨型钢框架-预应力复合支撑体系预应力受力机理, 拉索参数确定的影响系数方法及预估方法, 并从能量耗散角度及理想破坏模式角度讨论了体系抗震性能及拉索参数确定方法的可靠性, 还介绍了巨型钢框架-拉索支撑体系以及预应力巨型支撑-钢框架体系拉索参数的预估方法。

本书可供土木工程、工程力学等专业的科学研究人员、工程技术人员、研究生以及高等院校的教师和本科生参考。

责任编辑: 朱首明 李 明
责任设计: 赵明霞
责任校对: 陈晶晶 刘 钰

新型竖向预应力钢结构体系拉索参数确定理论

唐柏鉴 顾 盛 董 军 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 字数: 424 千字

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-15214-8

(23192)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言 |

预应力钢结构自 20 世纪 50 年代诞生以来,研究和应用都得到了较快发展。二战以后,百废待兴,用钢量难以满足应用需求,为节省工程用钢量,直接催生了预应力钢结构学科。时至经济快速发展年代,预应力钢结构的形势则如百花齐放,产生了各类新型预应力钢结构体系,特别是各类新型预应力空间钢结构体系。纵观整个预应力钢结构的发展历程,可以深刻发现预应力对于结构工程的巨大创新潜力。当前绿色建筑已经成为时代发展的呼唤,相比于其他建筑结构形式而言,无疑预应力钢结构更符合绿色建筑的要求。

相比于预应力空间钢结构的蓬勃发展,高层建筑钢结构中预应力技术的研究与应用却非常薄弱。得益于作者学生时代建立的对预应力技术的浓厚兴趣,在上海现代建筑设计集团的(20061B004-结)资助下,尝试开发新型高层钢结构体系,主要基于两点考虑:一方面,顺应技术创新及时代发展的潮流,在传统高层钢结构中尝试开发应用预应力技术;另一方面,在非线性和相对较强的预应力空间钢结构中难以突破的一些问题,比如弹塑性性能及极限状态、初步设计及定性评判方法、动载波动效应等,以预应力高层钢结构为切入点可能会寻求到一些新的思路。有幸得到了江苏科技大学蒋志勇教授及王自力教授的大力支持,专门组建了“江苏科技大学钢结构科技创新团队”。自 2006 年初至今,团队一直聚力研究预应力技术在多高层钢结构中的开发应用,在逐步形成“竖向预应力钢结构”概念的同时,我们认为解决拉索参数的确定方法是其核心问题和首要问题,研究工作得到了各类基金的资助。先后主持完成国家自然科学基金资助项目“附加阻尼的巨型钢框架—复合支撑体系性能研究(50948035)”、江苏省自然科学基金资助项目“巨型钢框架—预应力复合支撑体系性能研究(BK2009723)”、住房和城乡建设部资助项目“新型高层预应力钢结构体系关键技术研究(2012-k2-28)”等项目。本书是对前一阶段研究工作的总结。本书分为 8 章,并以巨型钢框架—预应力复合支撑体系为重点,主要内容安排如下:

第 1 章 介绍了预应力钢结构的基本特征及发展应用概况,重点介绍了竖向预应力钢结构的概念及其典型体系,综述了预应力钢结构拉索参数确定方法的研究现状。

第 2 章 从力学平衡角度研究巨型钢框架—预应力复合支撑体系在竖向荷载下的受力特征,分析复合支撑内力增量不平衡原因及调平方法,提出了影响系数调平方法。

第 3 章 从力学平衡角度研究巨型钢框架—预应力复合支撑体系在水平荷载下的受力特征,分析复合支撑内力增量不平衡原因及调平方法,提出了影响系数迭代调平方法。

第 4 章 建立巨型钢框架—预应力复合支撑体系简化变形模型,依据拉索作用建立拉

索参数确定准则，基于确定准则从变形协调角度分别建立拉索截面积及预拉力预估方法。

第5章 依据前三章理论确定巨型钢框架—预应力复合支撑体系工程算例的拉索参数，从内力分布特征及变形角度分析静载受力性能、从能量耗散角度分析体系地震动性能、从理想破坏模式角度分析体系极限状态。

第6章 建立巨型钢框架—拉索支撑体系简化变形模型，依据拉索作用建立拉索参数确定准则，基于确定准则从变形协调角度分别建立拉索截面积及预拉力预估方法。

第7章 建立预应力巨型支撑—钢框架体系简化变形模型，依据拉索作用建立拉索参数确定准则，基于确定准则从变形协调角度分别建立拉索截面积及预拉力预估方法。

第8章 总结上述三个典型体系拉索参数确定准则及分析方法，归纳得到以拉索参与抗侧为基本特征的竖向预应力钢结构体系拉索参数确定的一般准则及一般分析方法。

裴星洙教授主持研究了5.2节内容，邵建华博士主持研究了5.3节及5.4节内容，沈超明老师负责6.3节及7.3节缩尺模型的试验工作，研究生阮含婷、王佩、马郡等结合她们的学位论文参加了本书部分内容的研究，在此表示感谢！

特别感谢上海建筑设计研究院李亚明总工程师，本书的研究工作一直得到他的支持和关心。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

主要符号表

1. 单个符号含义

A	截面积
E	弹性模量
I	惯性矩
L	长度/跨度
H	巨型层层高 (主符号); 水平荷载 (上标)
PC	预应力拉索
b	刚性八字支撑, 框架梁 (第7章)
c	框架柱 (第7章)
mb	巨型梁
mc	巨型柱
cl	巨型柱柱肢
cw	巨型柱人字形腹杆
bw	巨型梁腹杆
θ	支撑 (拉索) 与水平线夹角
n	各大层包含的小层数
T	初始预拉力
V	竖向荷载
F	力, 集中荷载
M	弯矩
Q	剪力
P	拉索轴力
N	八字支撑轴力 (主符号); 大层层数 (下标)
f	水平均布荷载
q	竖向均布荷载
Δ	侧向位移
δ	柔度, 巨型梁或巨型柱的跨中位移
K	刚度

2. 典型符号释义

- A_{PC} 拉索截面积
- E_{cl} 巨型柱柱肢的弹性模量
- I_{mb} 巨型梁的截面惯性矩
- $K_{PC,J}$ 下标中第一个符号 PC 表示构件名称，下标中第二个符号 J 表示构件所在的楼层位置。 $K_{PC,J}$ 表示第 J 大层拉索的抗侧刚度。
- $\delta_{mb,N}^T$ 上标 T 表示引起位移的因素，下标中第一个符号 mb 表示构件名称，下标中第二个符号 N 表示构件所在的楼层位置。 $\delta_{mb,N}^T$ 表示预拉力 T 作用下第 N 大层巨型梁跨中竖向变形。
- Δ_J^H 上标 H 表示引起侧移的因素，下标 J 表示楼层的位置。 Δ_J^H 表示由水平荷载 H 引起的第 J 大层侧移。
- P_{N-1}^V 上标 V 表示引起拉索轴力的因素，下标 $N-1$ 表示拉索所在的楼层位置。 P_{N-1}^V 表示由竖向荷载 V 引起的第 $N-1$ 大层拉索的轴力增量。
- N_N^H 上标 H 表示引起八字支撑轴力的因素，下标 N 表示八字支撑所在的楼层位置，主符号 N 表示八字支撑的轴力。 N_N^H 表示由水平荷载 H 引起的第 N 大层八字支撑的轴力增量。

目 录 |

前 言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 预应力钢结构的概念与主要特点	1
1.2 预应力钢结构的发展与应用概况	1
1.3 竖向预应力钢结构体系	3
1.4 预应力钢结构拉索参数确定方法的研究现状	5
第 2 章 巨型钢框架—预应力复合支撑体系竖向荷载受力机理及 拉索预拉力确定理论	9
2.1 单大层	9
2.2 三大层	11
2.3 多大层	15
2.4 数值分析	17
第 3 章 巨型钢框架—预应力复合支撑体系水平荷载受力机理及 拉索截面确定理论	22
3.1 单大层	22
3.2 三大层	30
3.3 多大层	37
3.4 数值分析	38
第 4 章 巨型钢框架—预应力复合支撑体系复合支撑参数预估理论	43
4.1 复合支撑截面预估理论	43
4.2 拉索初始预拉力预估理论	64

第 5 章 巨型钢框架—预应力复合支撑体系结构性能数值分析	92
5.1 静载受力性能分析	92
5.2 地震动受力性能分析	120
5.3 破坏模式研究	140
5.4 抗震性能评估	164
第 6 章 巨型钢框架—拉索支撑体系拉索参数预估理论	174
6.1 拉索截面面积预估理论	174
6.2 拉索初始预拉力预估理论	183
6.3 试验研究	194
第 7 章 预应力巨型支撑—钢框架体系拉索参数预估理论	219
7.1 拉索截面面积预估理论	219
7.2 拉索初始预拉力预估理论	236
7.3 试验研究	243
第 8 章 竖向预应力钢结构体系拉索参数确定的一般准则及分析方法	250
8.1 预应力拉索的抗侧机理	250
8.2 单个体系拉索参数确定准则	251
8.3 拉索参数确定的一般准则	252
8.4 竖向预应力钢结构体系一般分析方法	253
8.5 研究展望	253
附录 1	255
附录 2	258
参考文献	262

第 1 章 绪 论

1.1 预应力钢结构的概念与主要特点

预应力钢结构是施加一定预应力的钢结构，属于工程结构学科中先进、科学、高效的新兴分支学科。预应力钢结构通过在钢结构的设计、制造、施工及加固过程中人为地在承重结构中引入与荷载应力符号相反的预应力，实现改善结构性能和充分利用材料强度的目的^[1,2]。

众所周知，混凝土结构中引入预应力，是为了控制混凝土的拉应力，使之只受压应力或者很小的拉应力，从而控制混凝土构件的裂缝，保证结构的刚度和使用功能。区别于预应力混凝土结构，钢结构中引入预应力，既可建立压应力，也可建立同样量级的拉应力，从这个意义上讲，预应力钢结构要比预应力混凝土结构更能充分利用材料。钢结构中引入预应力的目的^[3,4]主要是：

(1) 钢结构施加预应力后，能使钢材的拉、压强度在同一构件中得到充分利用，充分利用材料的弹性强度潜力，提高承载能力。一般钢结构的杆件在外荷载作用下都仅是单向受力构件，即杆件中的纤维不是受拉就是受压，而预应力钢结构的杆件则先使杆件在预加力作用下产生与外荷载作用效应相反的变形，如使杆件先预压，在外荷载作用下则杆件的纤维从受压状态到受拉状态，对于完全理想的钢材，其抗拉与抗压强度基本相同，这样，理论上就能使理想的钢材构件提高至两倍的弹性承载力。

(2) 改善结构的受力状态，有效节约钢材。预应力钢结构在预加力作用下可以改善结构的受力状态，降低内力峰值，节约用钢量。因为从预应力平衡外部荷载的观点来看，预加力可以平衡部分作用在构件上的荷载，所以能减小构件的截面积，节约用钢量。在超静定梁中采用强迫支座位移法施加预应力的预应力结构，当强迫中间支座位移时，就能使内支座的负弯矩峰值降低，可获得经济合理的截面。

(3) 提高结构的刚度和稳定性，减小结构的变形。预应力钢结构中所施加的预应力一般都是产生与外荷载相反方向的变形，在梁中即为起拱，因此，在外荷载作用下实际变形小，刚度好。

1.2 预应力钢结构的发展与应用概况

预应力技术是一项古老的工艺，很多世纪前就在工程、工具和人们生活中得到应用。如撑伞及锚定帐篷时“绷紧”要求的预张拉，弓箭的张弦，木桶木盆制造过程中“套箍”工序的预加压等，都是人们对预应力技术的应用。但是直到 20 世纪 50 年代，二次世界大战战

后重建时期,由于材料匮乏资金短缺要求降低用钢量节约成本,出现了在传统钢结构中引入预应力的预应力钢结构学科。欧洲学者如德国狄辛格教授(Dischinger),英国萨姆莱工程师(J. F. Samuely),比利时马涅理教授(G. Magnel),美国阿什通教授(L. Ashton)和前苏联瓦胡金工程师(М. Вахуркин)等,将预应力混凝土思想应用到钢结构中,产生了预应力钢结构,他们进行了理论分析和钢杆件、平行弦钢桁架等一些平面结构的模型试验,并建造了布鲁塞尔机场飞机库双跨预应力连续钢桁架门梁结构、前苏联双伸臂公路桥、英国伦敦国际展览会会标塔Skylon、德国三跨连续实腹梁公路桥和美国双曲悬索屋盖雷里竞技场等预应力钢结构。

20世纪60年代以后,传统钢结构涌现大量新型空间结构体系,如网架、网壳、折板、悬索及索膜结构等。而且计算机技术得到了迅速发展,进入到结构的计算、工程的设计、制造领域,为解决高难度计算与高精度加工问题提供了保障。此时,预应力钢结构由初始的探索和试验阶段发展为标志当代先进工程技术水平的一门新兴学科。1963年在国际上第一次出版了前苏联M1 Вахуркин教授的专著《预应力承重金属结构》一书,同年前苏联又出版了《预应力钢结构设计规程》,成为本学科统一工程实践的首部行动指南。这一时期兴建了美国加州冬奥会溜冰馆、纽约国际机场候机楼、慕尼黑奥运会主赛场馆、香港汇丰银行新楼等上百座预应力钢结构工程。

预应力钢结构技术在20世纪50年代传入我国并开始发展。一些专家学者在传统钢结构的基础上探索着预应力钢结构的特点、形式、效益和应用,并设计开发了一批平面体系的预应力钢结构工程:如大同煤矿($L=25\text{m}$)、太原钢厂($L=53\text{m}$)以及宁夏大武器电厂($L=60\text{m}$)等地的预应力输煤钢栈桥;太原钢厂钢坯车间的预应力钢吊车梁($L=24\text{m}$)等,都取得了良好的经济效果。80年代,随着科技的进步与工业的发展,预应力钢结构技术走出平面钢结构体系,转向预应力空间钢结构体系,同时实现了计算机技术与空间结构相结合,衍生出许多新型的预应力空间钢结构体系:如预应力网架、预应力网壳、预应力立体桁架、预应力空间张弦梁等。同时,兴建了一些预应力钢结构工程,如1984年的天津宁河体育馆,1987年的华北电力调度塔,1989年的亚运会主要场馆,1994年的攀枝花市体育馆,以及1996年的西昌铁路体育中心等工程,它们在当时已经具备了国际先进水平,后两项还采用了先进的多次预应力技术使耗钢量降低至 $50\text{kg}/\text{m}^2$ 以下^[5]。

进入到21世纪以来,空间结构特别是大跨度空间结构在全世界范围得到了巨大发展^[6]。国际、国内钢产量不断提高、钢材品种日渐丰富、钢材强度等级不断提高,为钢材在建筑结构领域的应用奠定了基础。同时,随着大型空间结构的日渐增多,人们对建筑造型和建筑的跨度提出了更高的要求,传统的钢结构表现出了明显的劣势,如用钢量大、稳定性低、结构体形庞大、造型简单等,难以满足人们对建筑轻盈、复杂、优美、经济的更高需要^[7,8]。由此,越来越多的专家和学者把研究的重点转向预应力钢结构,预应力钢结构无论在理论上、还是在试验研究及工程应用上都获得了前所未有的发展^[9~12],一批优秀的预应力钢结构工程也应运而生。在国际上,2002年日、韩世界杯体育场馆中,采用预应力大跨度钢结构体系的有13座,占总场馆数的65%;2004年雅典奥运会的主场馆均采用预应力大跨度钢结构体

系^[13]。在国内,出现了吉林速滑馆、亚运会朝阳体育馆、哈尔滨速滑馆等一批优质大跨度空间预应力钢结构体育场馆,接着2008年奥运会场馆建设秉承“科技奥运、绿色奥运、人文奥运”的理念,建设了国家体育馆、羽毛球馆、乒乓球馆、奥体中心综合训练馆、青岛帆船中心、奥体中心体育场改造等一批优质预应力奥运工程,它们都以优美的建筑造型、完善的使用功能和良好的经济指标傲立在奥运场馆的群体之中,它们的耗钢量都控制在 $100\text{kg}/\text{m}^2$ 以内,充分体现了“节俭办奥运”和“科技奥运”的理念^[14]。此外还兴建了广州会议展览中心、深圳会展中心、北京电视中心新楼等一批大型公共会展中心建筑,体现了预应力钢结构的优点,促进了预应力钢结构在我国的发展^[15,16]。其中部分工程的设计和施工达到国际领先水平。2006年12月1日,我国首部《预应力钢结构技术规程》(CECS 212—2006)颁布,成为指导预应力钢结构设计、施工的唯一全国通用标准^[17]。

总体来看,目前预应力技术主要应用于以下情况^[4]:

- (1) 需要大跨度及大体量无阻挡空间时,如体育场馆、会展中心、歌舞剧院、飞机库等;
- (2) 重级荷载及超重负荷条件时,如桥梁、多层仓库、多层停车场;
- (3) 活动及移动结构物,减轻自重是重要原则时,如塔吊、开启式体育馆、临时性展览厅;
- (4) 高耸结构物,稳定性及刚度是主导因素时,如无线电及电视塔、气象观测塔、高压输电塔等;
- (5) 高压大直径圆筒板结构,当不便增大或无法增大板厚时,如储液罐、储气罐、输油(气)管线、冷却塔等;
- (6) 在生产运营条件下加固服役结构物时,如在不停产条件下加固桥梁、运料栈桥、吊车梁、工业厂房等;
- (7) 创建新结构体系,以柔索取代受弯构件、以张力膜面取代刚性屋面层、以吊点取代支点等,如吊挂体系、索穹顶及索膜结构等。

综上所述,预应力钢结构的应用范围几乎已覆盖了全部钢结构领域,也就是说,适合应用钢结构的工程中都可以采用预应力技术。但同时也注意到,目前为止预应力技术在高层及超高层钢结构领域的研究和应用还属于薄弱环节。

1.3 竖向预应力钢结构体系

1.3.1 “竖向预应力钢结构体系”概念的形成

随着科学技术的飞速发展,工程建设要求扩大钢结构的应用,而又应该尽量节约钢材。解决矛盾的主要途径是:不断研究和改进现有的钢结构结构型式和设计理论,并创造新型的钢结构结构型式。在此过程中,预应力技术必不可少,各种型式的预应力钢结构或

预应力组合结构的研究与应用也应运而生。

2006年,陆赐麟^[18]介绍了北京电视中心引进预应力的“上挂下托”施工工艺,使竖向静载沿建筑高度的分布更加均匀,产生了很好的经济效益,为预应力在我国高层钢结构中的首次应用;而且相较于国外已有的几幢预应力高层钢结构而言,因为国外多数为悬挂体系,该方法为预应力钢结构开创了一种崭新的施工工艺。不过,这是施工过程中借助预应力限于对竖向静载的调节,包括国外已有的预应力高层钢结构体系,预应力作用也都是调节竖向荷载,或是将竖向压力转化为拉力,预应力还不参与抗侧、增加稳定等属于竖向体系的功能。

2008年,唐柏鉴等在前人关于巨型结构研究的基础上,为有效提高巨型钢框架的抗侧刚度,又能克服巨型桁架节点受力集中、构造复杂的缺陷,将预应力引入到巨型钢框架结构,提出巨型钢框架-预应力复合支撑体系^[19,20](全称 Mega Steel Frame - Prestressed Composite Bracing Structure,简称 MFPCBS,授权专利 ZL200720045216.5 及 ZL200710131100.8),如图 1-1(a)所示。

2009年,唐柏鉴、顾盛^[21]基于钢框架-支撑结构已有研究和应用状况,为克服连接节点繁多、耗费材料的缺陷,而保持较好的抗侧刚度,提出预应力巨型支撑-钢框架结构(全称 Prestressed Mega Bracing - Steel Frame Structure,简称 PMBFS,授权专利 ZL 200920233698.6),如图 1-1(c)所示。

对于建筑高度介于巨型钢框架和巨型钢框架-预应力复合支撑体系之间的结构,唐柏鉴等进一步提出了巨型钢框架-拉索支撑体系^[22](全称 Mega Steel Frame - Cable Bracing Structure,简称 MFCBS,授权专利 ZL201120000547.3),如图 1-1(b)所示。

同期还提出了其他一些相关体系,包括 Y 形摇摆柱预应力门式刚架体系(授权专利 ZL200920045721.9)、整体张拉门式刚架体系(受理专利 CN201110207942.3)、巨型钢框架-拉索吊挂体系等。上述预应力钢结构体系,都以拉索参与体系抗侧、增强结构稳定性为共同特征,逐步形成了“竖向预应力钢结构体系”的概念。

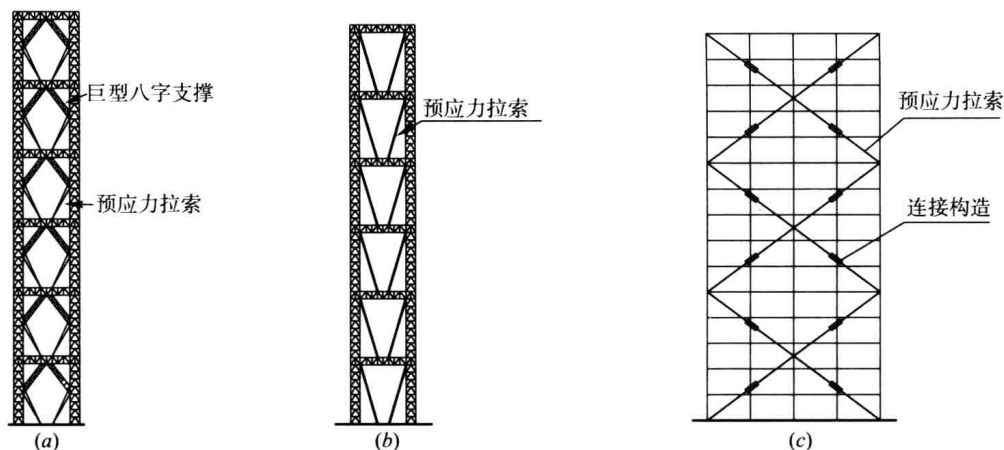


图 1-1 竖向预应力钢结构体系

(a) 巨型钢框架-预应力复合支撑体系; (b) 巨型钢框架-拉索支撑体系; (c) 预应力巨型支撑-钢框架结构

1.3.2 竖向预应力钢结构体系的特点及关键问题

竖向预应力钢结构体系是在多高层钢结构体系中主要通过拉索引入预拉力,藉以提高结构抗侧刚度、增加稳定性能以及改善结构受力性能的一种新型预应力钢结构形式,属于多高层钢结构与预应力拉索的综合应用。

应该注意的是,竖向预应力钢结构体系中的拉索与悬索是有严格区别的。尽管这两种索单元通常采用相同的材料并只能承受拉力,但这两种构件的性能是不同的。悬索中的张力是承受横向荷载的结果,其内力与变形的关系是非线性的,是典型的柔性构件。而竖向预应力钢结构体系中的拉索一般可以忽略横向荷载的作用。在后面的分析中可以知道,其内力与变形可以近似认为是线性的。

在传统钢结构体系中引进预应力拉索形成竖向预应力钢结构体系,无疑预应力拉索的作用是该体系的关键问题,这也是有别于预应力空间钢结构中预应力作用的新问题,而该问题的核心在于“预应力拉索参数确定”。因此,“预应力拉索作用及其参数确定”是竖向预应力钢结构体系首要的核心学术问题。

1.4 预应力钢结构拉索参数确定方法的研究现状

预应力扮演何种角色、如何确定预应力关键参数,始终是各类预应力钢结构的核心问题。

1.4.1 基于预拉力与某结构性能指标的关系,确定拉索预拉力的研究

1. 基于构件极限承载力,确定拉索预拉力

2002年,Chan Siu-Lai、舒赣平等^[23]通过简单模型理论推导及数值分析;2008年,R. R. de Araujo等^[24]通过缩尺模型试验和数值分析,研究了拉索撑杆式钢压杆初始缺陷、预拉力、撑杆刚度等对于极限承载力的影响关系,并以“极限承载力最大”为准则获得最佳初始预拉力;2011年,唐柏鉴等^[25]则基于拉索撑杆式钢压杆的一般模型,依据能量法构建了最佳初始预拉力的完备解。通过预拉力与某结构性能指标(构件极限承载力)的关系,建立预拉力的确定准则,无疑为其他预应力构件、甚至预应力结构提供了良好思路。

2. 基于力的平衡,确定预应力空间结构中的拉索预拉力

近20多年,预应力空间结构的研究和应用一直是热点;关于初始预应力确定问题,国外起步相对较早,近10年则以国内为主。

基于平衡矩阵理论确定索穹顶初始预应力分布,Pellegrino和Calladine 20世纪80~90年代做了开创性的工作。2001年,袁行飞、董石麟^[26]针对Geiger提出的索穹顶体系,从其特有的杆件拓扑关系入手,提出了整体可行预应力概念,即“杆受压、索受拉;同类杆件初始内力相等;满足整体自应力平衡”,依据该准则确定初始预应力分布,进而利用优

化方法求解预应力水平系数,获得索穹顶的最终预应力。2003~2004年,分别根据肋环形索穹顶和葵花形索穹顶的结构特征,从节点平衡入手,推导出初始预应力分布的快捷估算公式^[27,28]。2007年,基于上述整体可行概念,Yuan等^[29]提出了一种能够求解各种索穹顶结构的整体自应力模态方法(DSVD法),并对具有多个整体自应力模态的索穹顶结构,以外圈环索初内力最小为目标、以各模态组合系数为参数进行优化,获得最终预应力。2010年,Wang等^[30]考虑拉索自重,对Geiger索穹顶的上述预应力分布简化计算理论进行了完善。通过这些研究,可以比较方便地确定索穹顶拉索预应力分布,而且具有明确的结构概念,利于定性判断,纵观上述研究还深刻体现了“提出一般概念和准则→个体研究→归纳更普遍的方法”这样一条螺旋递进思路。

类似于索穹顶初始预应力分布模态的定性或简捷定量的确定方法研究,关于弦支穹顶的预应力值的这种确定方法也得到了一定研究。

2003年,康文江、陈志华等^[31]针对Lamella弦支穹顶的拓扑关系及目标工况的竖向静载受力特点,根据力的节点平衡,推导出拉索内力预估公式,继而再通过目标工况的静力、动力分析,迭代修正,获得最终拉索预拉力。

2010年,Cao等^[32]提出通过局部分析法,利用节点内力平衡关系,获得弦支穹顶的自应力分布模态;再根据弦支穹顶的构成关系、支座反力、节点内力平衡以及风载作用引起的拉索松弛效应等,综合确定拉索预拉力。然后按照设计规范,通过静力、动力分析,修正拉索预拉力。

根据上述研究成果,在实际工程的方案或初步设计中,可以比较方便地确定拉索预拉力值。但是很显然,上述确定方法还仅是依据荷载规范的目标工况,主要针对竖向静载,通过节点内力平衡关系,建立的拉索预拉力确定方法。至于工况过程中(比如仅有竖向恒载,竖向活载没有;或在竖向荷载基础上施加水平荷载等)对于拉索预拉力取值的影响;其他结构性能指标(比如位移限值、稳定性能等)如何制约拉索预应力取值等缺乏研究;超越目标工况的后期弹塑性行为更难以反映。而这些对于高层预应力钢结构至关重要。

1.4.2 基于参数分析,确定拉索截面积及预拉力的研究

上述研究是从拉索预拉力与结构某性能指标的关系,主要根据结构拓扑特征,着眼于力的平衡,确定预拉力等参数。通过参数分析,研究拉索截面积及预拉力变化对于结构性能的影响,从而确定较优的拉索参数,同时获得了一定研究。

2001年,田畑博章、岡田章、斎藤公男^[33]针对第一类张拉整体桁架拱,构建了一种简单模型,设定三种预拉力值级别,对比分析了该模型的受力性能,包括各杆件内力、控制点挠度以及自振频率等基本动力特性。

2006年,唐红等^[34]针对武汉体育中心体育馆张弦天穹网壳,依据“通过控制预应力拉索的变形来控制网壳的变形”,进行预应力设计,对拉索与网壳进行整体非线性分析,

确保各组合工况下拉索目标内力与初始预拉力相等，从而控制了拉索变形。该文提出了一种示范性的实际设计过程，但分析工作量巨大。

2008年，任俊超、张其林等^[35]针对郑州会展中心的斜拉式张弦桁架结构，利用 ANSYS，间隔变化预拉力值，研究预拉力值与结构稳定安全系数以及屈曲模态的关系，认为预拉力值对结构稳定性性能的影响比较复杂，无明显规律。

2009年，Xue 等^[36]针对上海 Yuanshen 竞技场张弦梁结构，利用 ANSYS，对矢跨比、梁截面尺寸、拉索直径等参数，通过间隔变化这些参数的取值，获得了适合于该工程的参数；进一步对拉索预拉力值，利用 ANSYS 优化功能，进行了优化分析。认为拉索预拉力取值准则为：使恒载作用下张弦梁的最大挠度尽可能小。

2010年，刘学春、张爱林^[37]首次将粒子群优化算法引进到预应力钢结构优化中，考虑荷载多工况作用，对几何形状、预应力度、截面尺寸实现同步优化，研究成果应用于2008奥运会羽毛球馆。

关于预应力空间结构中拉索参数对于结构性能的影响研究，上述研究具有前阶段的典型特征，即针对具体工程或具体的结构形式，通过一定的数值分析方法，以某几种最不利工况（一般按照荷载规范确定），在弹性范围内研究拉索参数与结构性能的影响关系，从而指导该工程设计、施工。要害在于针对具体工程进行数值分析，获得的参数影响规律缺乏理论支撑，普遍适用准则难以获得。

1.4.3 预应力钢结构的弹塑性分析

随着分析技术的提高以及计算机硬件发展，近年关于预应力钢结构的塑性分析开始展开。

2007年，孔丹丹、丁洁民^[38]针对三个不同形式的张弦空间结构实际工程，以恒定的拉索直径和预拉力，对它们进行了弹塑性全过程分线性分析，讨论了屈服机制、失效机制。并以目标工况，对简化的张弦网壳进行了参数分析，分析了撑杆高度、预拉力大小、荷载对称性等对张弦网壳极限承载力的影响。

2008年，河野俊作、岡田章等^[39]针对原先按照弹性设计的张弦结构（已建成），按照日本保有水平耐力概念，根据静载增分解析获得的恢复力模型，分别采用地震动时程分析和质点模型等价线性化法，进行了罕遇地震弹塑性分析，验证了上述结构满足现行日本规范。

2011年，D. Yan 等^[40]利用塑性极限分析方法，通过设定合理的破坏机制，根据能量平衡原理，研究了单塔斜拉桥的冗余度。

当然，塑性发展过程中拉索的作用、拉索参数变化的影响尚未研究，至于根据塑性状态下的结构特征如何确定拉索截面积及预拉力更是未见报道。

1.4.4 预应力钢结构拉索参数确定方法研究现状的综述

综合上述预应力钢构件及预应力空间结构，关于拉索截面积及初始预拉力确定方法的

研究，可以认为：

(1) 拉索预拉力研究相对较多，但拉索截面积则研究较少。

存在问题：对于超静定结构，拉索截面积对于结构的刚度、构件内力分配等都有重要影响，而且拉索截面积与预拉力值实际是相互关联。在竖向预应力钢结构体系中尤其如此。

(2) 根据结构的拓扑关系，以目标工况（主要是竖向荷载），利用力的平衡关系，建立了较简捷的预拉力预估方法。

存在问题：仅以目标工况作为确定拉索参数的依据，对于工况过程中以及其他工况下，拉索参数的确定依据缺乏研究；仅以力的平衡确定拉索参数，其他结构性能指标如何确定拉索参数缺乏研究；仅以弹性状态确定拉索参数，罕遇状态下结构发生塑性后，拉索参数的确定依据缺乏研究。这些对于竖向预应力钢结构至关重要。

(3) 针对具体结构，采用间隔变化拉索参数，对拉索参数的影响规律进行了研究，并以目标工况下结构性能为判断准则，确定较优的拉索参数。

存在问题：拉索参数的影响规律一般只适用于该具体结构，难以指导普遍工程；获得的拉索参数影响规律，大多通过一定数量的数值分析获得。

(4) 预应力空间钢结构的塑性研究刚刚起步。

大量的预应力钢结构工程实践证明了它的先进性、经济性、科学性和在土木建筑工程中广阔的应用前景，但预应力钢结构毕竟属于新学科，在许多方面需要完善与深化。大力开展科研与创新工作，完善学科、丰富学科、发展学科的历史责任摆在广大专业工作者的面前。本书在预应力高层钢结构体系方面作了一些创新和探索，如能有助于预应力钢结构学科的顺利发展，作者将倍感欣慰。