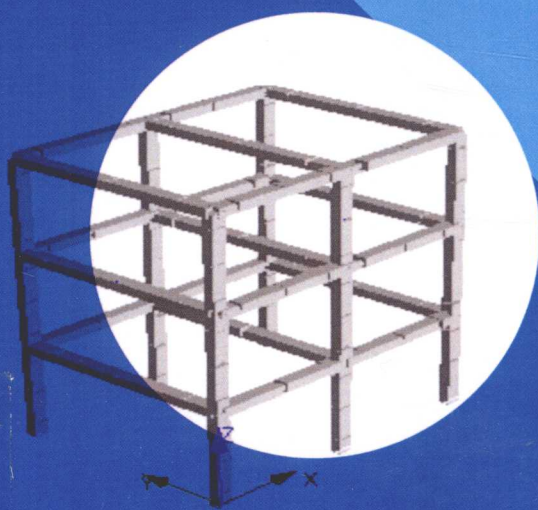


基于特征参量的 工程结构设计方法研究

JIYU TEZHENG CANLIANG DE
GONGCHENG JIEGOU SHEJI FANGFA YANJIU

吴泽玉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于特征参量的 工程结构设计方法研究

吴泽玉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

结构的频率和振型由结构的质量和刚度所决定,且仅与结构的材料特性和几何尺寸有关。任何荷载效应都会以位移的形式予以表现,而结构振型正是结构位移的完备正交基,任何变形都能以振型为坐标基进行展开。通过位移可以建立应变关系式,相应可求出应力和内力值。

本书内容主要涉及频率设计和振型设计。对于频率敏感的结构,按频率调整方法进行设计,利用这些规律指导三座混凝土雷达塔的频率设计;而对于结构振型调整,提出利用特征参量指导结构概念设计和构造设计,进而满足结构的性态设计。

本书可以作为相关教师和工程技术人员学习结构概念和构造设计、研究结构性态设计的参考用书。

图书在版编目(C I P)数据

基于特征参量的工程结构设计方法研究 / 吴泽玉著
— 北京:中国水利水电出版社,2016.8
ISBN 978-7-5170-4717-9

I. ①基… II. ①吴… III. ①工程结构—结构设计
IV. ①TU318

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第209898号

书 名	基于特征参量的工程结构设计方法研究 JIYU TEZHENG CANLIANG DE GONGCHENG JIEGOU SHEJI FANGFA YANJIU
作 者	吴泽玉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.5印张 202千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

结构的频率和振型由结构的质量和刚度所决定，且仅与结构的材料特性和几何尺寸有关，是结构的固有特征参量。结构的频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系；结构的振型向量表征了结构局部分布刚度与局部分布质量之间的相对比值关系。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下，结构最易产生的分解反应类型的顺序。

概念设计从结构总体出发，宏观上把握结构的力学性能，即结构体型确定，结构在荷载作用下的荷载效应就完全确定。例如，抗震设计中对强柱弱梁、强剪弱弯和强节点弱构件等的规定，就是从整体上要求结构在地震作用下的表现性能。另外，在抗震规范中规定：结构宜简单、规则、对称，也是从整体角度把握结构的力学性能。构造设计是对结构计算的补充，是为了弥补结构理论计算的不足，构造设计对构件尺寸或钢筋量进行控制，确保结构使用安全。频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系，对以频率或周期为控制目标的结构具有重要的指导意义。结构的振型向量表征了结构局部分布刚度与局部分布质量之间的相对比值关系。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下，结构最易产生的分解反应类型的顺序。众所周知，任何荷载效应都会以位移的形式予以表现，而结构振型正是结构位移的完备正交基，任何变形都能以振型为坐标基进行展开。通过位移可以建立应变关系式，相应可求出应力和内力值。所以，结构的内力、应力和应变都可依振型为坐标基进行展开。这就要求在结构概念设计阶段，结构体型确定后，先进行模态分析，进而通过对结构有效质量参与系数的分析与控制，提前对结构反应有利的振型阶次，推迟对结构反应不利的振型阶次，这样在结构概念设计阶段就能对整个力学性能进行把握，使结构满足安全性需要。

全书内容包括频率设计和振型设计。对于频率敏感的结构，可按书中频率调整方法进行设计，利用这些规律指导三座混凝土雷达塔的频率设计；而对于结构振型调整，提出利用特征参量指导结构概念设计和构造设计，进而指导结

构的性态设计。

本书出版得到国家自然科学基金（50978232）、河南省教育厅项目（14B560029）和华北水利水电大学高层次人才启动基金（201246）资助，特此致谢！

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

吴泽玉

2016年5月于华北水利水电大学龙子湖校区

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概念设计、构造设计与结构特征参量	1
1.1.1 概念设计和构造设计	1
1.1.2 结构特征参量	1
1.1.3 概念设计、构造设计与结构特征参量三者之间的关系	2
1.2 性能设计的发展	3
1.3 Pushover 方法的计算原理及应用	4
1.4 国内外研究现状	5
1.4.1 特征参量指导结构的概念设计和构造设计	5
1.4.2 特征参量指导结构性能设计	6
1.4.3 目前特征参量指导结构设计存在的问题	7
1.5 研究目的	7
1.6 研究的内容和主要工作	7
第 2 章 基于频率分析的工程结构设计方法研究	9
2.1 预应力和恒载对结构频率的影响分析	9
2.1.1 受预应力作用的梁动力学方程	9
2.1.2 受预应力作用的梁动力学方程求解	10
2.1.3 受预应力作用的梁动力学方程有限元解法	11
2.1.4 受恒载作用下梁动力学方程	18
2.1.5 同时考虑恒载和预应力效应对结构频率影响分析	18
2.2 梁特性对结构频率的影响分析	19
2.3 调整与控制高耸塔式结构基本频率的基本原则	25
2.3.1 调整自振频率的手段	25
2.3.2 调整与控制高耸塔式结构基本频率的基本原则	30
2.3.3 高耸塔式结构基本频率影响参数敏感性分析	31
2.3.4 高耸塔式结构基本频率调整实例	34
2.4 某雷达塔动力特性现场测试	36
2.4.1 基本频率测试方案	36
2.4.2 模态识别结果	42

2.4.3	频率识别结果与计算结果的对比	52
第3章	基于振型分析的工程结构设计方法研究	53
3.1	振型分类及能量独立性证明	53
3.2	结构位移的振型展开	59
3.3	基于振型的结构反应计算式推导	61
3.4	振型在结构构件设计上的应用研究	62
3.4.1	振型振动方式的两阶段评判	62
3.4.2	位移展开满足精度要求的振型数判别式	64
3.4.3	适中柱和普通梁位移向量在振型坐标基上的投影分析	66
3.4.4	短柱和深受弯构件位移向量在振型坐标基上的投影分析	70
3.5	振型分析对结构设计的指导作用	75
第4章	特征参量在结构设计中的综合应用	78
4.1	频率对渡槽三向预应力张拉顺序的指导作用	78
4.1.1	渡槽项目的研究背景	78
4.1.2	渡槽分析模型	78
4.1.3	3种预应力槽型动力特性分析	80
4.1.4	无肋矩形渡槽预应力张拉顺序分析	81
4.1.5	频率指导渡槽预应力张拉顺序分析结论	84
4.2	梁柱尺寸对节点核心区振型参与度的影响分析	85
4.2.1	节点核心区振型参与度的定义	85
4.2.2	梁跨高比变化对节点振型参与度的影响	85
4.2.3	柱剪跨比变化对节点振型参与度的影响	87
4.2.4	节点核心区振型参与度结论	89
第5章	工程结构动力计算参数和性态目标的确定	91
5.1	动力计算方法和地震波的选取	91
5.2	地震波、反应谱和功率谱的相互转化	91
5.2.1	由反应谱生成地震波	91
5.2.2	由地震波生成反应谱	93
5.2.3	地震波和反应谱相互生成例题	93
5.3	弹塑性反应谱的生成	97
5.4	性态目标的确定	98
5.5	斜靠式拱桥动力特性和地震分析	98
5.6	考虑空间和时间效应的连续梁桥地震反应分析	102
第6章	基于特征参量的工程结构性态设计	108
6.1	基于特征参量分析的工程结构性态设计一般步骤	108
6.2	多模态自适应 Pushover 分析方法	108

6.2.1	Pushover 方法和特征参量分析	108
6.2.2	自适应多模态 Pushover 方法实现过程	109
6.2.3	多模态自适应 Pushover 优点	110
6.3	考虑 P - delta 效应的高桥墩性态设计	113
第 7 章	结论与展望	117
7.1	结论	117
7.2	展望	118
参考文献		119

第 1 章 绪 论

1.1 概念设计、构造设计与结构特征参量

1.1.1 概念设计和构造设计

目前的结构设计都是基于截面的结构设计方法。结构设计过程包括概念设计、计算设计和构造设计 3 个阶段。概念设计是结构设计的核心,是整个结构设计中最重要、最复杂的部分,是设计的灵魂^[1]。无数次的地震震害表明,概念设计往往比计算设计更为重要^[2]。概念设计从宏观上规定了结构的平、立面构形,以及质量和刚度在各方向上的分布,它的优劣直接决定了结构整体受力性能和各杆件之间力的传递方式,对杆件的受力分析和构造设计具有十分重要的影响。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[3]和《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T 1302—01—2008)^[4]都从整体角度出发,宏观上定义了规则结构和不规则结构,用来指导结构设计。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,结构设计要有明确的规则性;对于不规则结构,按规定采取加强措施;特别不规则结构应进行专门研究和论证;禁止采用严重不规则结构。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、高层规范对于平面和竖向不规则分别用图表的方式予以阐述;《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T 1302—2008)用跨度和墩高等参量区分了规则桥梁和不规则桥梁。设计大师林同炎指出^[5],结构设计应从整体出发,创造性地提出整体、分体系和构件设计之间的关系,这正是概念设计的思想。在结构荷载设计阶段,根据不同的结构型式和使用功能,因地制宜选用材料,满足安全、适用和耐久性要求。荷载不仅包括恒载、使用活载,更要包括影响侧移的风载,对于抗震设防区,还包括相应等级的地震作用。所有荷载作用效应之和与结构承载能力极限状态和正常使用极限状态相比较,满足相应规范要求^[6-9]。根据结构在竖向和横向荷载作用下的表现,以及历次震害的经验总结,对结构配筋和截面尺寸最小值予以规定,当计算值小于构造要求时,按构造配置。例如,在规范^[6,7,9]中箍筋和纵筋的最小配筋率及间距、梁柱的最小截面尺寸和构造柱配筋以及圈梁尺寸和配筋等,都属于构造要求,在设计时必须严格执行。

1.1.2 结构特征参量

结构的频率和振型由结构的质量和刚度所决定,且仅与结构的材料特性和几何尺寸有关,是结构的固有特征参量。结构的频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系;结构的振型向量表征了结构局部分布刚度与局部分布质量之间的相对



比值关系。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下,结构最易产生的分解反应类型的顺序。当然,外界环境的温度和湿度会影响结构的刚度,进而改变结构振型和频率值^[10,11],但这种影响很小,是微不足道的,常忽略不计。因此,结构的材料特性和几何尺寸一旦确定,频率和振型便随之确定。对于多自由度体系,特征参量计算式为^[12,13]

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{X}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{X}\} = \{0\} \quad (1.1)$$

式中 $[\mathbf{M}]$ ——质量矩阵;

$[\mathbf{K}]$ ——刚度矩阵;

$\{\ddot{\mathbf{X}}\}$ ——加速度矩阵;

$\{\mathbf{X}\}$ ——位移矩阵。

对于方程式(1.1),假定方程的解为

$$\{\mathbf{V}\} = \{\bar{\mathbf{X}}\} \sin(\omega t + \theta) \quad (1.2)$$

式中 $\{\bar{\mathbf{X}}\}$ ——振动幅值;

ω ——振动圆频率;

θ ——初始振动的相位角。

将式(1.2)代入式(1.1)中,经整理可得

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}]\{\bar{\mathbf{X}}\} = \{0\} \quad (1.3)$$

由式(1.3)可求出结构的特征参量,即频率和振型。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下,结构最易产生的分解反应类型的顺序,而结构的频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系。利用振型可以指导结构概念设计和构造设计;频率用来控制结构荷载效应,满足适用性要求^[14],也可用来直接指导结构设计,满足结构特殊要求^[15-17]。例如,在桥梁工程中,常用基本频率确定冲击系数,指导结构设计^[18],也有用基本频率求解结构稳定性的临界荷载问题^[19]。

1.1.3 概念设计、构造设计与结构特征参量三者之间的关系

概念设计从结构总体出发,宏观上把握结构的力学性能,即结构体型确定,结构在荷载作用下的荷载效应就完全确定。例如,抗震设计中对抗柱弱梁、强剪弱弯和强节点弱构件等的规定,就是从整体上要求结构在地震作用下的表现性能。另外,在抗震规范中规定:结构宜简单、规则、对称,也是从整体角度把握结构的力学性能。构造设计是对结构计算的补充,是为了弥补结构理论计算的不足,构造设计对构件尺寸或钢筋量进行控制,确保结构使用安全。频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系,对以频率或周期为控制目标的结构具有重要的指导意义。结构的振型向量表征了结构局部分布刚度与局部分布质量之间的相对比值关系。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下,结构最易产生的分解反应类型的顺序。众所周知,任何荷载效应都会以位移的形式予以表现,而结构振型正是结构位移的完备正交基,任何变形都能以振型为坐标基进行展开。通过位移可以建立应变关系式,相应可求出应力和内力值。所以,结构的内力、应力和应变都可依振型为坐标基进行展开。这样就要求在结构概念设计阶段,结构体型确定后,先进行模态分析,进而通过对结构有效质量参与系数的分析与控制,提前对结构反应有利的振型阶次,推迟对结构反应不利的振型阶次,这样在结构概念设计阶段,就能对



整个力学性能进行把握，使结构满足安全性需要。

1.2 性态设计的发展

不论是我国建筑抗震规范的“三水准、两阶段”设计思想，还是桥梁抗震细则中的“两水准、两阶段”设计理念，二者都是确保结构在小震作用下的强度验算和大震作用下的变形验算满足相应规范要求^[3,4]。这种抗震设计思想在历次地震中对确保人的生命安全方面起到了较好的效果。然而这些抗震规范设计思想都是以确保人的生命安全为唯一设防目标提出来的，历次地震暴露出一些新的问题。例如，1989年的美国 Loma Prieta 7.1 级地震，伤亡数百人，经济损失 150 亿美元；1994 年的美国 Northridge 6.7 级地震，伤亡仅 57 人，经济损失 170 亿美元；再如 1995 年日本阪神 7.1 级地震，死亡 5500 人，经济损失为 1000 亿美元；还有 1999 年我国台湾集集 7.3 级地震，死亡 2405 人，经济损失 100 亿美元。这些地震表明，地震伤亡人数不多，但造成的经济损失却相当惊人。震害表明，仅以保护人的生命安全为单一设防目标的抗震设计思想已不能满足现代抗震设防需要，于是，基于性能的抗震设计思想在这样的背景下产生了^[20-29]。1989 年美国教授 Bertero^[30]在总结加州 Loma Prieta 地震时曾提出基于性能的抗震设计思想，它是对传统抗震设计理念的一种扬弃：它继承了传统抗震理论的分阶段设计思想，同时对结构进行全寿命费用-效益分析，将经济损失纳入震后评价指标，即在确定抗震性能目标时应包括人身安全和财产损失两个方面。M. J. N. Priestley 教授^[31]提出了基于位移的抗震设计方法，实际上就是基于性能的抗震设计思想的具体体现。基于性能的抗震设计和常规设计的对比如图 1.1 所示；基于性能的抗震设计流程如图 1.2 所示。

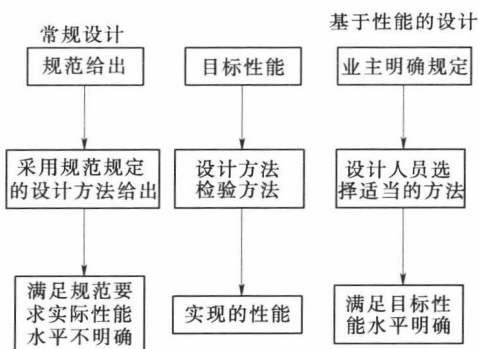


图 1.1 常规设计和基于性能设计过程对比

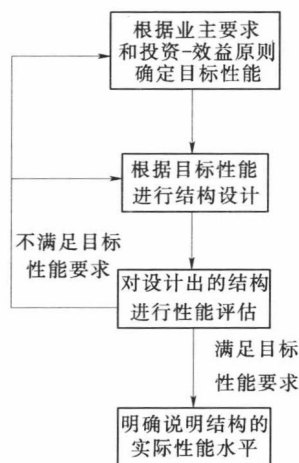


图 1.2 基于性能的抗震设计流程

目前，我国在基于性能的抗震设计方面也取得了积极成果^[32-40]。王光远等^[32]采用最优设防烈度对结构性态目标进行度量，并对结构“小震不坏、中震可修、大震不倒”的可靠度采用模糊数学的方法做了量化分析，建立了基于最优烈度的抗震优化模型。周锡元^[33,34]指出，基于性能的抗震设计是一个很长的过程，结构设计尚需照顾技术和管理方面



的问题。谢礼立 2004 年编写出版了一本自愿采用的《建筑抗震性能化设计通则》^[41]，系统、完整地介绍了基于性能的抗震设计通用规则。我国新修订的《建筑抗震设计规范》明确规定了基于性能的抗震设计^[3]。

1.3 Pushover 方法的计算原理及应用

Pushover 方法与底部剪力法相比，能反映结构屈服后的力学性能^[42]；与时程分析法相比，其计算方法简单、计算量较小^[43]。因此，Pushover 方法在各国抗震设计中得到广泛应用。传统 Pushover 方法基于以下两个假定^[44-47]：

(1) 结构可等效为单自由度体系，即结构变形由第一振型控制。

(2) 沿结构高度的变形由振型 $\{\varphi\}$ 表示，在整个加载过程中，不管结构变形状态如何，形状向量 $\{\phi\}$ 均不变。

在实施传统 Pushover 分析时，较难确定的就是结构的侧向荷载加载模式^[48-50]，当侧向荷载加载方案确定后，计算出侧向荷载的作用效应，与竖向荷载效应累加，当某部分构件屈服时，将屈服构件的一端或两端改为铰接点，再依次增大侧向荷载值，直到整体结构成为机构或结构达到了预定的位移量，计算结束。从传统 Pushover 方法计算过程可以看出，Pushover 计算假定具有两个很强的局限性：第一，模拟地震计算只能考虑第一振型对结构侧向力的影响，对于近似单自由度和剪切型结构，传统 Pushover 计算精度满足工程需要，对于柔性结构和高振型这种对结构影响较大的地震反应，传统 Pushover 方法就显得无能为力了；第二，当变形进入屈服后，沿结构高度或跨度方向的振型会发生显著变化，水平力计算选用不变的振型很不合适。鉴于此两条假定，各国学者提出了很多修正的 Pushover 方法，以克服传统 Pushover 计算方法的不足^[51-59]。其中，较为通用的方法有自适应 Pushover 方法 (Adaptive Pushover Analysis Method, APAM)、模态 Pushover 方法 (Modal Pushover Analysis Method, MPAM) 和 N2 方法等。下面简要介绍自适应的 Pushover 方法实施过程^[48]。

(1) 建立结构的力学模型并有限元离散化。

(2) 确定输入合理地震动的弹性反应谱。

(3) 对力学模型进行动力特性分析，求出周期和振型，并按式 (1.4) 求解振型参与系数，即

$$\Gamma_j = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^N W_i \varphi_{ij} \quad (1.4)$$

式中 W_i ——第 i 层的重量；

φ_{ij} ——第 j 振型相应于 i 质点振型值，并归一化使其满足 $\sum W_i \varphi_{ij}^2 = 1$ ；

N ——结构总层数。

(4) 计算各层的侧向荷载，即

$$F_{ij} = \Gamma_j \varphi_{ij} W_i S_a(j) \quad (1.5)$$

式中 $S_a(j)$ ——对应周期的最大加速度值，可由反应谱确定；

F_{ij} ——第 j 振型在 i 质点的侧向荷载值。



(5) 按式 (1.5) 得到的侧向荷载作用于结构上, 计算 j 振型基底剪力 V_j , 即

$$V_j = \sum_{i=1}^N F_{ij} \quad (1.6)$$

(6) 考虑多振型影响, 根据结构各周期相关程度, 选用适当方法 (如 SRSS 方法或 CQC 方法) 组合各振型的基底剪力。

(7) 将第 (5) 步得到的基底剪力 V_j 分成若干个增量形式, 逐步施加到结构上, 即

$$\begin{aligned} \bar{V}_j &= S_n V_j \\ S_n &= \frac{V_B}{N_s V} \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中 S_n ——增量系数;

V_B ——基底剪力估计值;

N_s ——加载步数。

(8) 将第 (7) 步得到的相应于各振型的荷载增量 $\bar{V}_j$ 对结构进行静力推覆分析, 计算每一个振型产生的层位移和基底剪力, 并用适当方法进行组合, 累加到前一步计算结果中。

(9) 每一个加载循环结束, 比较计算得到的层间剪力和相应的层间剪力屈服值, 如有某一层或某几层达到屈服, 则重新调整结构的刚度矩阵, 进行动力特征分析, 然后回到步骤 (3) 继续下面计算。

(10) 重复以上计算, 直到整个结构达到规定的位移值或形成机构, 计算结束。

从自适应 Pushover 方法计算过程可以看出, 与传统 Pushover 方法相比, 自适应 Pushover 方法克服了传统 Pushover 方法的两个假定限制, 计算精度有大幅提高。当然, 自适应 Pushover 方法还存在一些问题, 如每次循环计算时参与计算振型数量仍然靠经验确定。

1.4 国内外研究现状

1.4.1 特征参量指导结构的概念设计和构造设计

结构的频率向量表征了结构总体分布刚度与总体分布质量之间的绝对比值关系, 关于频率在结构设计和损伤检测上应用的工程实例比比皆是。ISO 2631 国家标准化组织规定人体所能承受的频率范围: 上限一般取 80Hz 左右, 而下限则取 1~2Hz (对于水平振动) 或 4~8Hz (对于竖向振动)。为了满足使用者的舒适性和结构安全性需要, H. Bachmann^[60]通过对人与结构相互作用的研究, 给出了常用结构频率范围的建议, 如表 1.1 所列。Xip-ing Wang 等^[61]用木桥第一弯曲频率估计桥梁整体刚度的方法, 取得了较好的结果。JinHung Hwang 等^[62]对台湾地区四座土坝的动力特性分析发现, 二维土坝模型不能较好地模拟大坝的动力特性——对于土坝, 坝越高, 基本频率越大。尽管温度对频率有所影响^[10, 63], 一般来说, 频率仅与结构质量和刚度有关, 当结构有损伤时, 质量变化较小, 结构的刚度有明显降低。反映到结构动力特性上, 就是频率降低和振型在损伤处的突变。因此, 可通过结构频率的改变来反演结构刚度降低的程度^[64, 65]。Hideo Takabatake^[66-69]用



Galerkin 和近似闭合解分析了恒载对结构频率和力学性能的影响,得出结论:对于自重轻的结构,结构的安全度低于自重大的结构^[70];周世军、朱晞等^[71-74]用有限元给出了相似的结论。张家玮等^[75-77]推广恒载效应对结构受力的影响,给出初应力位形和恒载效应对梁的受力影响。在抗震规范中规定,软弱场地宜建刚性结构,而刚性场地宜建柔性结构就是频率应用的具体范例。

表 1.1

避开人引起震动的结构频率范围

单位: Hz

结构类型	结构形式			
	钢筋混凝土	预应力混凝土	钢筋混凝土	钢结构
健身房、体育馆	>7.5	>8.0	>8.5	>9.0
没有固定座位的舞厅、音乐厅	>6.5	>7.0	>7.5	>8.0
有固定座位的音乐厅、电影院、看台 古典或流行轻音乐厅	>3.4	>3.4	>3.4	>3.4
流行打击音乐厅	>6.5	>6.5	>6.5	>6.5
结构水平方向	>2.5	>2.5	>2.5	>2.5

注 步行桥: 避开 1.6~2.4 Hz (低阻尼结构: 3.5~4.5 Hz)。

结构的振型向量表征了结构局部分布刚度与局部分布质量之间的相对比值关系。振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下,结构最易产生的分解反应类型的顺序。现阶段,振型主要应用于结构在动力荷载作用反应分析和结构健康检测^[78-87]。基于多自由度体系各振型能量互不传递特性^[88],王福智、邢世玲等^[89,90]建议用振型方向系数描述振型振动特性。史铁花^[91-93]通过对结构振型的分析,得到了振型分解反应谱法中振型阶次的确定和扭转振型的判定,从而对结构设计具有积极的指导意义。Hiroki Yamaguchi、布占宇等^[94-96]用振型能量理论确定了结构不同构件阻尼比的计算方法,计算结果与试验结果接近。

从以上分析可以看出,目前对结构特征参量的分析主要集中在结构抗震设防和损伤检测等方面,具体应用特征参量指导结构设计的非常少见。2010年,王东炜等^[97,98]提出用特征参量指导结构设计,尤其是概念设计和构造设计,计算结果满足相关规范要求^[99],计算成果应用到工程实践中,取得了较好的经济效果和社会效应。

1.4.2 特征参量指导结构性态设计

由于性态设计不仅考虑人的生命安全,而且将经济损失纳入结构设计的分析范围;不仅考虑规范规定的最低要求,而且照顾使用者的使用要求和经济能力,因此,性态设计将成为今后结构设计的主流方向。对结构进行动力特性分析,使结构的基本周期(基频)避开场地的特征周期(基频),避免场地和结构发生共振和类共振。同时,利用 Pushover 方法分析结构的抗力性能,振型数量由质量参与系数确定^[43,100]。Pushover 方法简单,概念明确,容易被工程技术人员掌握,而且 Pushover 方法能反映整个结构的力学性能和杆件屈服的先后顺序。在 Pushover 方法加载过程中,侧向力加载可取基于振型形状的加载模式。因此,在结构设计时,尽量使结构振型多以平动振型和弯曲振型为主,提前对结构反应有利的振型阶次,推迟对结构反应不利的振型阶次,使整个结构受力合理,满足结构可



靠度需要。

1.4.3 目前特征参量指导结构设计存在的问题

目前,特征参量主要用于动力学分析和结构损伤检测等方面,将振型分类,利用振型指导结构概念设计和构造设计,进而指导结构性态设计,关于这方面的文献较少。由于振型是结构位移展开的完备正交基,利用振型展开位移阶次的确定也未查到相关文献。利用振型和位移之间的关系式,就可建立振型与内力和应力的关系表达式,为性态设计提供理论支持。为了避免高耸塔式结构基本频率和设备频率遇合的问题,如何调整结构基频的理论指导原则尚没有相关研究。另外,如何利用特征参量指导梁柱设计,以及用特征参量指导梁柱节点设计也未查到相关文献。利用等效荷载法反映预应力效应对频率的影响,给出考虑预应力效应的动力学方程式,推导出预应力效应的有限元刚度矩阵。为了克服传统 Pushover 方法存在的缺点,有必要发展一种新的 Pushover 方法,为结构性态设计提供理论准备。

1.5 研究目的

本书研究在国家自然科学基金“基于特征参量控制的工程结构设计方法研究”(50978232)的资助下,系统研究了影响结构特征参量的各种参数,进而对振型进行分类和量化,指导结构概念设计。结构振型不仅是结构动力学分析的参量,因为振型也是位移展开的完备正交基,振型向量分量的阶次表述了在外界环境作用下,结构最易产生的分解反应类型的顺序,故也可指导结构静力学分析。通过位移展开,可建立内力和应力在空间振型上的展开公式,进而通过对结构有效质量参与系数的分析与控制,提前对结构反应有利的振型阶次,推迟对结构反应不利的振型阶次,实现指导结构概念设计和构造设计的目的。工程结构避免“先天性”缺陷,满足安全性、适用性、耐久性和经济性的要求。利用振型的荷载效应展开,指导结构构造设计。为了满足基于性态的抗震设计理念,对结构输入的动力参数和性态指标进行了研究,利用静力弹塑性方法指导结构性态设计。

1.6 研究的内容和主要工作

综合以上论述,首先讨论了等效荷载法求预应力对频率的影响,进而给出高耸塔式结构频率调整的一般原则,分析了影响基本频率的结构参数;对结构的振型进行分类和量化,再以振型为工具,得到梁柱一般力学性能规律;通过对梁柱节点核心区振型参与度的研究,给出了核心区力学性能的量化方法。根据以上分析,拟研究的内容和主要工作如下。

(1) 利用等效荷载法求预应力对频率影响,推导出直线形、折线形和曲线形预应力效应动力学方程式,并给出有限元法求预应力对频率影响的一般计算过程,得到预应力对频率影响的一般规律。

(2) 高耸塔式结构基本频率调整的一般原则及影响参量研究。由于高耸塔式结构多呈



柔性,如何提高其基本频率,避免和设备频率的遇合,需从理论上予以研究,在此基础上指导结构设计。

(3) 为了利用振型指导结构设计,先通过基于振型的位移展开,建立了应力、应变振型展开式。位移展开首先要确定位移展开所需振型的阶数,故需给出位移展开所需振型数的判别式;再通过对梁和柱的位移展开,得到梁和柱力学性能的一般规律。

(4) 提出以节点核心区振型参与度为参量,反映核心区在梁柱节点中的力学性能变化情况。分析梁柱节点随柱剪跨比和梁跨高比减小所引起的力学性能变化的一般规律。

(5) 为了克服传统 Pushover 方法的缺陷,提出新的多模态自适应 Pushover 方法(MMAPM)。本方法不仅能克服传统 Pushover 方法的缺陷,而且给出了某方向参与计算振型数确定的一般方法,为结构性态设计提供理论支持。

(6) 考虑竖向地震作用的桥梁高墩 P-delta 效应的能量求解法。与其他方法相比,能量法较为简单,通用性强,且能考虑竖向地震作用,值得在工程实践中推广使用。

第2章 基于频率分析的工程结构设计方法研究

2.1 预应力和恒载对结构频率的影响分析

2.1.1 受预应力作用的梁动力学方程

(1) 无阻尼等截面受弯梁自由振动平衡方程式为

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

式中 $v(x,t)$ ——梁横向挠度；

$\bar{m}$ ——质量分布集度；

EI ——梁弯曲刚度。

(2) 无阻尼等截面受弯梁考虑直线预应力筋影响，预应力可等效为轴向压力 N 表示，包括轴向力影响的自由振动平衡方程式，即

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + N \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2.2)$$

式中 N ——梁所受的不变轴向压力。

(3) 无阻尼等截面受弯梁考虑预应力筋偏心距的影响，预应力可等效为轴力 N 和均布荷载 q_e (图 2.1)，包括等效荷载影响的自由振动平衡方程式，即

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + N \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = q_e \quad (2.3)$$

式中 q_e ——预应力筋产生的等效荷载集度；

N ——张力 F 的水平投影。

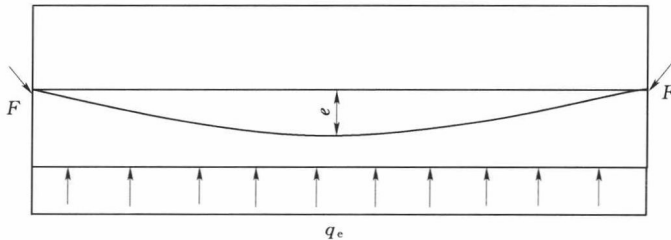


图 2.1 预应力等效荷载

假定预应力 F 对跨中截面轴线有 e 的偏心距，预应力产生的弯矩为^[101]