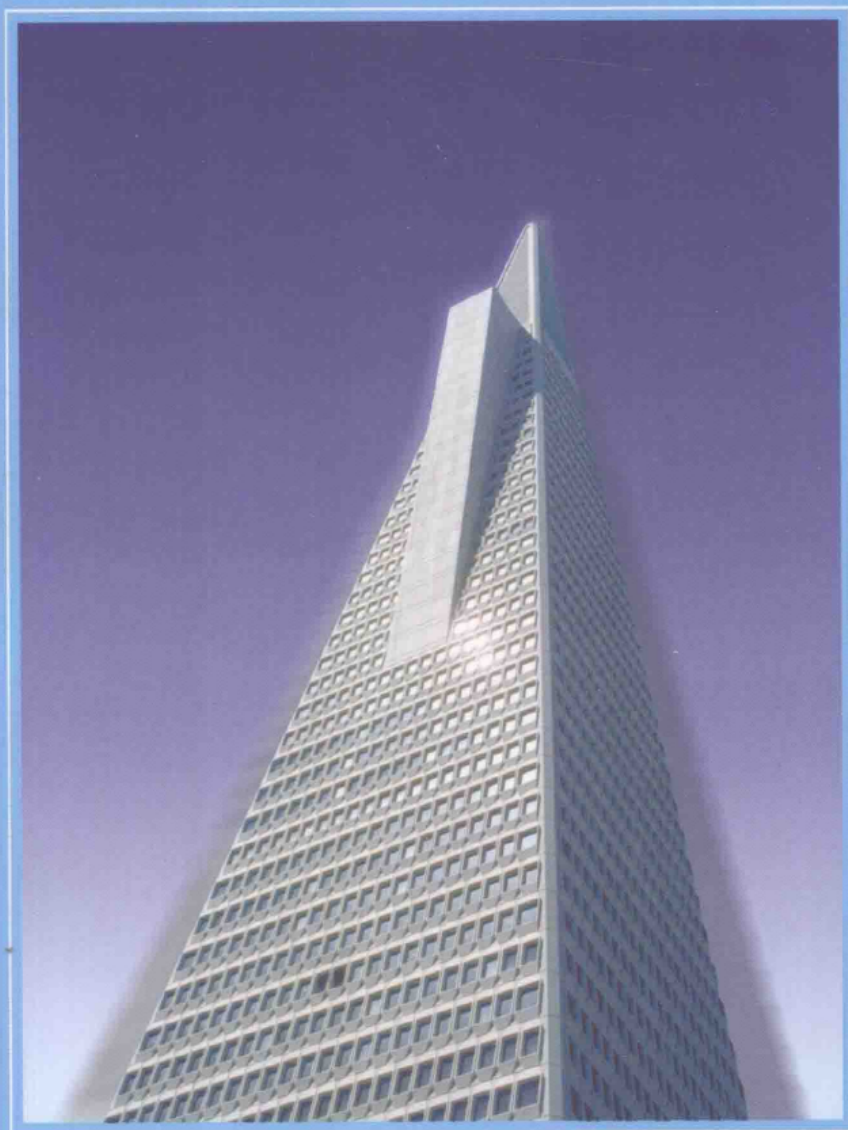


建筑振动 理论与实践

——第三届全国建筑振动学术会议论文集



中国 昆明

2000年8月14日~17日

云南科技出版社

建筑振动理论与实践

——第三届全国建筑振动学术会议论文集

主 编：叶燎原

副主编：白 羽 杨晓东

中国 昆明

2000年8月14日～17日

云南科技出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑振动理论与实践/叶燎原主编. --昆明:
云南科技出版社
ISBN 7-5416-1124-7

I.建... II.叶... III.建筑物-振动-研究-文集
IV.TB53-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 39712 号

书 名: 建筑振动理论与实践
出 版 者: 云南科技出版社
责任编辑: 王 韬
印 刷 者: 云南电子计算中心科技彩印厂
发 行 者: 云南科技出版社
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 24.25
字 数: 600 千
版 次: 2000 年 8 月第 1 版
印 次: 2000 年 8 月第 1 次印刷
印 数: 1~500 册
书 号: ISBN7-5416-1124-7/TU·10
定 价: 120.00 元
若发现印装错误请与承印厂联系

第三届全国建筑振动学术会议

(昆明 2000年8月14日~17日)

学术委员会

主任: 徐建(机械工业部设计研究院)

副主任: 叶燎原(昆明理工大学)

委员: 周廷垣(机械工业部设计研究院)

潘复兰(中国兵器工业第五设计研究院)

翟荣民(华北电力设计院)

程耿东(大连理工大学)

鲍臻(机械工业部设计研究院)

王锡康(冶金部建筑研究总院)

杨文君(中国寰球化学工程公司)

陈龙珠(浙江大学)

缪升(昆明理工大学)

周亦唐(昆明理工大学)

组织委员会

主任: 叶燎原

副主任: 缪升 申立中

委员: 白羽 杨晓东 陈随海 潘文 白良 王时越 赵川 车文华

主编: 叶燎原

副主编: 白羽 杨晓东

序 言

随着国家经济建设的飞速发展，对建筑振动学科领域的科学研究、新技术成果应用要求也越来越高。经有关主管部门批准，中国工程建设标准化协会于 1995 年成立了建筑振动专业委员会。专业委员会的主要任务是组织开展全国建筑振动领域的科学研究与学术活动，受主管部门委托制订、修订、审查和管理建筑振动方面的国家和行业标准，开展国际交流与合作，组织编写发行建筑振动标准化的刊物和专著，承担建筑振动的工程咨询和技术服务等。为不断总结交流我国在建筑振动领域取得的科研成果、技术、经验和新产品，专业委员会分别于 1995 年在无锡、1997 年在浙江大学召开了第一、第二届学术交流会。

目前，为积极响应国家“西部大开发”战略的实施，专业委员会决定在云南昆明召开第三届学术会议。会议得到了全国高校、科研单位、生产单位等行业建筑振动领域的专家学者和广大技术人员的大力支持。经筛选，在来稿中共遴选出 65 篇学术论文入选论文集，由云南科技出版社正式出版。入选论文共分六个主要部分：（1）动力机器基础的设计与理论；（2）隔振设计与理论；（3）建筑物抗微振分析的设计与理论；（4）地基与桩的动力特性与测试技术；（5）建筑物地震、风振响应与控制技术；（6）振动理论与测试技术。

会议在中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会的具体指导下召开，并得到了机械工业部设计研究院和昆明理工大学等单位的大力支持。我们特向所有关心、支持、参与、赞助本次会议的单位和个人表示衷心的感谢！

会议学术委员会主任 徐 建 教授级高工

会议学术委员会副主任 叶燎原 教授

目 录

一、动力机器基础的设计与理论

动力机器基础设计理论研究与发展建议·····	徐 建	(1)
评述汽轮发电机基础动力优化设计的发展·····	翟荣民	(6)
弹性半空间理论设计压缩基础的工程实例剖析·····	杨文君	(18)
对非均质地基动力影响深度和参振土质量的研究·····	王锡康	(23)
动力基础设计计算理论之思辨·····	陈 炯	(28)
透平压缩机基础的振动与选型·····	冯文龙	(36)
对框架式基础动力计算的讨论·····	王宇红	(41)
动力基础设计参数量测方法之评论·····	陈 炯	(46)
基础扭转振动试验·····	黄河清	(51)
某大型离心机设备基础设计分析·····	马良云	(55)

二、隔震设计与理论

弹簧的波动刚度与阻尼·····	杨先健	(61)
大型压力机的振动与隔振问题·····	杨先健	(67)
上安电厂钢球磨煤机弹簧隔振基础的设计·····	贾吉林	(73)
弹簧隔振基础在火电厂动力机器基础中的应用·····	张淑琴	(79)
摩擦耗能支撑体系摩擦耗能器的设计及实验研究·····	杨晓东	(85)
精密测量平台的隔振设计·····	骆险峰	(89)
北京市电机总厂计算机房的隔振设计及其处理·····	刘战军	(92)

三、建筑物振动与抗微振的设计与理论

惯导实验室设计的防微振技术·····	俞渭雄	(96)
钢筋混凝土肋形楼盖振动特性的测定分析·····	张应之	(108)
锻锤振动对屋架影响的估算·····	吴邦达	(113)
厦门某厂 HCP 厂房楼盖系统的振动及其处理·····	周正炳	(118)

楼板振动计算的近似法·····	张慧娥 (124)
模型煤气柜振动台试验研究·····	曹卫平 (134)
大型煤气柜风振计算·····	曹卫平 (140)
在静水内压和轴向荷载作用下圆柱薄壳的屈辱曲·····	缪升 (146)

四、地基与桩的动力特性与测试技术

桩的抗剪刚度计算方法·····	刘纯康 (152)
反射波法基桩质量分类方法探讨·····	吴成元 (157)
搅拌桩复合地基土的动力性能探讨·····	白良 (164)
天然地基抗压刚度系数与瑞利波波速间的关系·····	李席珍 (169)
论作用力对地基土刚度影响问题·····	苏振儒 (176)
上海地铁二号线一期工程地基土动力特性研究·····	祝龙根 (182)
一种新型的地脉动测量与分析系统·····	乔陶鹏 (187)
层状饱和地基上刚性圆板的竖向振动·····	陈胜立 (194)
复杂地质条件下嵌岩桩质量检测实例分析·····	孙元贵 (200)
太原市城区杂填土动力性能的试验研究·····	刘彦忠 (205)
上覆单相弹性的饱和地基上弹性板的竖向振动特性研究·····	陈胜立 (211)
黄土场地软弱土层对地面地震反应影响分析·····	宁春明 (217)
地面屏障与刚体基础并联隔振设计·····	万叶青 (223)

五、建筑物地震、风振响应及控制技术

PUSH-OVER 方法的原理及其在我国的研究及应用进展·····	叶燎原 (229)
核设备抗震试验振动台地震波输入的要求·····	胡晓 (235)
高层建筑调频液体阻尼器抗震控制参数研究与简化设计·····	李春祥 (241)
黄土场地土层刚度变化对地面地震反应的影响·····	廖红建 (249)
高强 SRC 压弯柱抗震性能的试验研究·····	李向民 (256)
低周循环加载下耗能支撑框架的损伤及可靠度分析·····	肖艳玲 (261)
钢筋混凝土结构在地震作用下的损伤累积性能研究·····	王立明 (267)
不规则地震力作用下可液化土层的临界剪切波速·····	郭抗美 (274)
建造真正的耐震建筑·····	楼永林 (281)
台湾 9.21 大地震地面破坏机理浅析·····	陈随海 (285)
底层全框架房屋抗震设计·····	张大伟 (290)
对结构横风向驰振计算改进的建议·····	盛焕明 (294)
建筑结构—透明边界系统时程地震反应分析·····	沈冯强 (299)
两种结构隔墙抗震性能试验研究·····	朱彤 (305)

随机地震作用下土坡最危险滑动面的确定方法·····	赵 川 (311)
北京某民航综合楼结构隔震设计与分析·····	张晓欣 (317)
姚安地震表现出的设计与施工质量问题的·····	费维水 (323)

六、振动理论与测试技术

正交各向异性板的有阻尼振动·····	缪 升 (327)
工场振动传播的分析与预测·····	杨国泰 (331)
一种的结构振动半主动控制算法——等效力开关控制法·····	李 江 (337)
结构振动多态混和控制研究·····	徐建功 (343)
斜交桥预应力钢筋砼空心板梁测试及计算分析·····	白 羽 (349)
高层建筑原型动力特性的测量·····	严普强 (353)
钢结构人行天桥的动力特性·····	潘 文 (359)
噪音敏感建筑物集中区域高强噪声与振动控制方法分析·····	战嘉恺 (365)
煤矿主井振动监测与故障诊断·····	张长会 (369)
$\delta_{i,j} \neq 0$ 且 ω_i 值有重根时的主振型分析·····	关 群 (375)

动力机器基础设计理论 研究与发展建议

徐 建^①

(机械工业部设计研究院 北京 100089)

摘 要: 动力机器基础是工业建筑设计的重要部分。如果设计不当,基础产生过大的振动将影响机器的工作精度、仪器仪表的正常测量和操作人员的身心健康,严重时机器产生损坏或无法正常工作。动力机器基础设计的目标是限制基础的振动量,因此如何确定振动量是基础设计的关键。动力机器基础最初的设计采用经验方法,通过加大基础质量来控制其振动量。随着科学的发展,动力机器基础的设计形成了质量-弹簧-阻尼器理论(以下简称质弹阻理论)和弹性半空间理论。本文通过对动力机器基础设计中的若干问题进行讨论,对我国动力机器基础设计理论的研究方向提出建议。

关键词: 动力机器基础, 设计理论, 质弹阻, 弹性半空间

1 两种理论体系的讨论

1.1 质弹阻理论

质弹阻理论假定地基为无质量的弹簧,基础为仅有质量的无弹性刚体,采用单自由度体系进行分析。我国历次国家标准《动力机器基础设计规范》均采用质弹阻理论,几十年来据之设计的动力机器基础都能满足使用要求,并积累了大量的实测资料。

(1) 质弹阻理论的优点。

- 1) 方便、简单、实用、直观;在我国应用时间长,工程设计人员比较熟悉。
- 2) 由现场实测地基动力参数,可靠性较大。
- 3) 对于锻锤、框架式基础等上部结构为定刚度模型、下部结构为变刚度模型时,采用弹性半空间理论很难进行分析,而采用质弹阻理论分析则很简便。

(2) 质弹阻理论的缺点。

- 1) 在理论上有一定的缺陷,虽然可以通过较多的试验数据和设计经验进行修正,使之与实测结果相接近,但并不是所有情况都通过修正能加以解决。

^①徐建,男,1958 年出生,教授级高工

2) 地基动力参数需要通过试验确定, 试验工作量大, 而且试验基础与实际基础相比要小得多, 其影响深度也相差较大, 由此带来一定的误差。

3) 质弹阻理论把地基和基础视为质量-弹簧-阻尼系统有很大的近似性, 首先地基决不是理想的弹簧和阻尼器, 其刚度和阻尼也不是常数, 而是随着振动程度强弱和地基特性等因素而变化; 其次由于地基的弹塑性性质和变形的不可逆性, 在不同阶段测试的数据不相同, 质弹阻理论无法考虑这些问题。

4) 按质弹阻理论设计的基础体积相对较大。

1.2 弹性半空间理论

弹性半空间理论假定地基为均质的、各向同性的弹性半空间体, 采用弹性理论进行分析。弹性半空间理论目前我国研究的相对较少, 国外研究成果已十分丰富。从理论上弹性半空间理论有广泛的适用范围, 可适用于各种类型的地基(如很厚的均质土层、置于刚性岩石上的单层或多层土层、波速随深度变化的土层), 适用于各种形状的基础(圆形、方形、条型及任意复杂形状)。弹性半空间理论有多种分析方法, 如以弹性动力学为基础的数学力学解析法和半解析法、采用动力有限元的离散法、采用边界单元法及有限层法的分析-离散联合法, 并根据以上三种方法经简化提出各种拟合公式或实用图表。

弹性半空间理论的优点是: 在理论上比较完善, 采用该理论可不做试验或少做试验。其缺点是: 要解决弹性半空间理论的实用化, 对所计算的理论值要进行适当的修正, 也需要足够实测资料进行统计分析, 我国目前在这方面已有的实测数据还形不成统计规律。

2 地基刚度 C_z 值的确定

地基刚度 C_z 通过试验确定似乎是合理的, 但却存在着试验基础与实际基础的尺寸、压力等差别的影响。如果一直通过试验来确定地基刚度在技术经济上也是不合理的, 因此应该在大量试验数据的基础上寻求合理的统计规律。

地基刚度 C_z 值与什么参数建立关系更合理, 主要取决于它们之间统计规律的合理性、相关系数的大小和这种统计规律是否简单易行。目前 C_z 值的确定存在三种观点:

- (1) C_z 值与变形模量 E_0 建立关系;
- (2) C_z 值与波速 V_s 建立关系;
- (3) C_z 值与地基承载力 f_k 建立关系。

2.1 C_z 值与地基承载力 f_k 的关系

C_z 值与地基承载力 f_k 建立关系是由原苏联学者巴欠坎提出来的, 原苏联和我国《动力机器基础设计规范》都采用这个方法。采用 f_k 与 C_z 值建立关系有一定的合理性, f_k 反映了地基的应力-应变关系、土的密实度和状态、土的孔隙比和含水量, 反映了土的种类和土的综合特性。采用 f_k 与 C_z 值建立关系简单易行, 我国工程技术人员比较熟悉, 已经积累了大量的资料, 而且 f_k 是工程地质勘察中必须给定的指标。

采用 f_k 与 C_z 值建立关系存在的问题是：地基承载力 f_k 的确定可以有多种方法（如标贯试验、载荷试验、根据物理指标确定），不同方法确定的 f_k 值相差较大，而且勘察单位所提出的地基承载力受人为因素影响较多，一般情况下所提出的 f_k 值偏小，这对于静力设计是偏于安全的，但用来确定 C_z 就不一定合适了。

现行国家规范中按 f_k 求出的 C_z 值比的现场实测值小，这是由于规范中的 C_z 值没有计入参振质量 m_s ，而参振质量 m_s 至今无法定量在规范中只能回避了，因此所计算的振幅将大于实测值。虽然规范中规定对于天然地基大块式基础所计算的竖向和水平向动线位移分别乘以折减系数 0.7 和 0.85 进行修正，但这种修正方法是很粗糙的。

2.2 C_z 值与波速 V_s 的关系

波速反映了地基的弹性特性，其值 V_s 比较稳定，测试具有一定的精度。波速的测定属原位测试，更有意义的是比现场模型试验可测得较大深度范围内土层的动力特性，目前已成为工程地质勘察中必须给定的指标。

采用波速 V_s 与 C_z 建立关系存在的问题是：波速测试的应变量级比动力机器基础应变量较小，所以 C_z 值偏高，需要根据不同类型机器基础给予修正，我国目前这方面实测资料还较少。

在波速 V_s 与 C_z 值建立关系方面国内已做过一些研究工作：机械工业部设计研究院对收集到的 23 个场地 44 份试验资料进行统计分析，所建立的 C_z 和 V_s 关系中考虑的因素相对较少。机械工业部第二勘察院通过对 23 份以强迫振动为主的试验资料进行统计分析建立了 V_s 与 C_z 值关系，存在的问题是由 V_s 计算的 C_z 值与按强迫振动测试资料反算的 C_z 值相差较大，对于面积较小基础的 C_z 值偏大，面积较大基础的 C_z 值偏小。沈阳勘察公司通过 10 份测试资料统计分析建立了 V_s 与 C_z 值关系，但当 $V_s=0$ 时得到的 C_z 值为虚数，这是不合理的。

2.3 C_z 值与变形模量 E_0 的关系

目前俄罗斯采用 C_z 与 E_0 建立关系。我国的变形模量是由现场静荷试验确定，荷载板的面积通常为 $0.25 \sim 0.5 \text{ m}^2$ ，其影响深度较小，不能满足动力机器基础设计的要求。通过 $P-S$ 曲线确定 E_0 ，采用割线法时取什么压力范围，采用切线法时如何保证切线的正确性，都是值得研究的问题。考虑到我国国情，目前 E_0 与 C_z 建立关系的实测资料甚少，开展这项工作会有很大的难度。

2.4 今后开展工作的思路

- (1) 建立 C_z 值与土的类型、地基承载力、波速的关系，更全面地反映 C_z 的实际情况。
- (2) 建立 V_s 与 f_k 的关系，以便于更好的利用已有的试验资料，并通过积累 V_s 与 C_z 关系的实测资料，建立 V_s 与 C_z 的关系，为少做试验或不做试验创造条件。

3 动力机器基础设计中几个问题的讨论

3.1 参振土质量 m_s

参振土质量是在质弹阻理论中分析似合试验数据的手段,并不是有质量为 m_s 的土体随基础一起振动,参振土质量的确定存在以下问题:

- (1) 对于同一试验基础,采用激振法和自由振动法求得的参振土质量相差较大。
- (2) 同一试验基础的不同方向,其参振土质量均不相同。
- (3) 不同的激振力也会影响参振土质量的大小。
- (4) 参振土质量的规律性差。

虽然现行国家标准《动力机器基础设计规范》对计算的线位移进行修正而回避了参振土质量,问题并没有得到真正的解决,对参振土质量还需做进一步的研究工作。

3.2 基础的扭转振动

现行国家标准《动力机器基础设计规范》中给出的各种地基刚度之间关系是借鉴原苏联规范,规范中基础扭转振动的数据是采用水平向偏心敲击得到的,由于试验基础的尺寸较小,得到的数据比较离散。

我国的基础扭转振动的实测资料极少,近年来有的单位尝试采用偏心安装激振器的方法进行试验,得出基础扭转刚度的试验数据。这种做法也存在不同的意见:

- (1) 振型的耦合应该如何分析?
- (2) 水平向偏心激振首先测得的是水平回转振动,由于扭转刚度大于抗剪刚度,扭转振动是否会被水平回转振动所掩盖?这方面还需做一步研究工作。

3.3 阻尼比

虽然现行国家标准《动力机器基础设计规范》在阻尼比的确定方法上做了重大修改,但还存在以下问题。

- (1) 水平回转第二振型阻尼比的实测资料很少,规范中将其值取为与第一振型阻尼比相同,这只能是一种简单而近似的处理方法。
- (2) 现行规范给出的阻尼比是偏小的,虽然偏于安全,却导致设计的基础偏大。
- (3) 扭转振型的阻尼比还需要进一步研究。

3.4 桩基的动力特性

我国现行国家标准《动力机器基础设计规范》对于桩基动力特性的确定不考虑桩本身弹性变形,这与原苏联 1958 年规范的模式是一致的,而原苏联 79 年规范考虑了桩本身的特性。通过多年来设计实践发现:随着桩长的增加、桩身材料的不同以及桩截面系数的差异,计算中应该考虑桩的弹性变形,在这方面国内已做过一些研究工作并提出计算方法,对该计算方法也存在不同观点,通过对某些工程实测与计算对比发现,计算值比实测值小,且出现一些反常的现象,当桩的截面相同、长度不同、打入均质的土中,桩越短计算的刚度越大。因些有必要通过工程实测与计算结果的对比,调整考虑桩身弹性变形的计算方法,

使桩基刚度的计算更为合理。

3.5 测试曲线的选取

我国地基动力特性测试采用 $A \cdot f$ 幅频曲线, 随着振动分析方法和设备的发展, 能否采用时程曲线进行分析? 采用时程曲线不仅信息量比幅频曲线大得多, 还可以较真实的“反分析”。在采用时程分析的同时, 要掌握试验场地土的物理力学指标、标贯值、波速值、静荷载试验资料, 为地基动力特性的数理统计分析提供基础资料。

4 我国动力机器基础设计理论发展建议

弹性半空间理论具有理论完善、可以不做试验或少做试验的优点, 可以做为我国动力机器基础设计理论的发展方向, 但弹性半空间理论在实用化和试验数据验证方面还有一定的差距, 目前采用弹性半空间理论取代质弹阻理论还是不现实的。做为规范的修订和学术研究, 可以采用以下两个分支开展工作:

(1) 按弹性半空间理论体系作为发展目标进行研究, 重点放在实用化及主要参数的确定, 要提出一套完整的计算方法。

(2) 对质弹阻理论体系进行完善, 对其中的不足之处进行修正, 使之更加合理, 如果能减少试验工作量, 这种理论体系还是具有一定发展前景的。

如果两个分支的研究都能达到预期的效果, 可以在规范的形式上采用质弹阻模式, 理论分析上采用弹性半空间的方法, 规范中可以明确仅对重要的工程和机器采用试验确定动力参数, 对于特殊的问题可以采用有限元的方法进行分析。

我国有自己的国情, 我们可以学习和借鉴国际上的先进经验, 但不可照搬外国现有的模式。我国在动力机器基础设计方面有较高的理论水平, 有丰富的模型基础和实体基础试验资料, 只要我们在吸取国内外各种设计理论优点的基础上, 提出符合我国国情的设计方法, 就会使我国动力机器基础的设计具有先进的水平。

评述汽轮发电机基础动力优化设计的发展

翟荣民^① 周建军 李兴利

(华北电力设计院, 北京 100011)

提 要: 回顾了我国汽轮发电机基础动力优化设计的发展历程, 介绍了该领域的最新研究成果, 通过对三个典型实例的剖析, 阐述作者一些新的思路, 论证了该成果在动力优化领域具有广阔的应用前景, 并指出进一步推动汽轮发电机基础动力优化设计发展的设想。

关键词: 汽轮发电机基础 动力优化设计

汽轮发电机是火力发电厂、核电站的关键设备, 人们通常称之为电厂的心脏。作为支承汽轮发电机的基础, 其动力特性的优劣将直接影响着机组的安全稳定运行, 因此其重要性显而易见。由于汽轮发电机组本体结构复杂, 同时有着众多的高温、高压管道与汽轮发电机组连接, 一些辅助设备亦需紧邻汽轮发电机本体布置等, 致使汽轮发电机基础成为一个十分复杂的空间框架结构。通常人们把汽轮发电机基础视作火电厂极其重要的特种结构来对待。

汽轮发电机基础的动力分析属于结构动力学范畴, 同时涉及转子动力学、机械振动问题; 如何进行汽轮发电机基础动力分析? 什么样的汽轮发电机基础动力特性好, 有利于机组的长期安全运行? 这些一直是人们十分关注的课题, 特别是随着电力建设的发展, 单机容量不断增加, 对汽机基础振动的要求更加严格, 因此汽轮发电机基础的动力特性优化设计就成为国际上亟待解决的重要前沿课题。长期以来, 国内外很多专家学者都致力于这方面的研究, 并取得了大量卓有成效的研究成果。就我国开展的汽轮发电机基础优化设计课题研究的广度和深度以及所取得的研究成果来看, 是国外无可比拟的, 应该说, 我国在汽轮发电机基础动力优化设计理论研究和设计实践上已具有相当水平。

本文将对汽轮发电机基础动力优化设计的发展进行综合评述, 提出作者对推动动力优化设计进一步发展的一些观点, 希望得到更多的理解和支持。作者深信, 汽轮发电机基础动力优化设计在我国必将取得突破性的进展。

1 汽轮发电机基础动力优化设计发展的三个阶段

纵观我国汽轮发电机基础动力优化设计的发展, 大体上可分为三个阶段。建国初期,

^① 翟荣民, 男, 1934.12 出生, 教授级高工

电力设计工作全面学习原苏联经验, 汽轮发电机基础动力分析全部采用苏联的设计方法, 即单自由度体系、振幅控制的方法。当时, 发电机组单机容量比较小, 尽管人们远还没有能提出基础动力优化设计问题, 但在学习采用苏联设计方法时, 电力建设研究所等对苏联予以提出的振幅计算公式(见下述)进行了研究分析:

$$A = \mu_{\max} \cdot f \cdot P \cdot \left(\frac{n_0}{n} \right)^2$$

式中: A —基础最大振幅

$\mu_{\max}$ —动力系数最大值

f —柔度系数(单位力作用下基础的静力挠度)

n_0 —基础自振频率

n —机器工作转速

P —挠力的幅值

对单自由度体系:

$$n_0 = \frac{30}{\sqrt{w \cdot f}} \text{ r/min}$$

将 n_0 代入上述公式, 经过整理后得:

$$A = \alpha \cdot \frac{w_g}{w}$$

式中: α —系数

w_g —转子重量

w —基础质量

由此可见: 基础的振幅取决于转子重量 w_g 及基础的质量 w ; 在上述分析的基础上, 又进行了模型试验等工作。通过大量研究分析, 电力建设研究所、华东、华北电力设计院等率先提出了“轻型基础”的概念, 并分别在半山电厂(12MW 机组)、天津第一发电厂(25MW 机组)采用, 基础的柱子由 $1 \times 1\text{m}$ 、 $1.2 \times 1.2\text{m}$ 分别减少为 $0.6 \times 0.6\text{m}$ 、 $0.7 \times 0.7\text{m}$, 实现了“轻型基础”的设想, 取得了很大的成功。这项成果受到了各级领导的肯定和重视, 之后在其他工程中得到普遍运用。作者认为, “轻型基础”的设计研究, 是我国电力土建设计研究人员首次对汽轮发电机基础动力优化设计的有益探索, 是我国汽机基础动力优化设计发展第一阶段的明显标志。

随着电力工业的发展, 单机容量不断增加, 对汽机基础振动提出了更高要求, 特别是计算技术的发展, 使汽轮发电机基础的动力分析方法有可能从单自由度体系过渡到空间多自由度体系, 以适应形势发展的需要。70 年代中期, 我国组织了一支由设计、科研、高校等单位的专家组成的课题研究组, 集中发挥各自优势, 就涉及汽轮发电机基础动力特性的各个方面进行了研究分析, 从研究工作的深度和广度来看, 都是国外无可比拟的。研究工作取得了丰硕的成果, 1979 年基于研究成果而颁发了我国第一本“动力机器基础设计规范”, 提出了一套完整的空间多自由度的结构动力分析方法。凭借动力分析方法的发展

展,依据“轻型基础”的广泛实践,通过大量的研究分析,使汽轮发电机基础动力优化设计大大向前跨了一步。作为我国汽轮发电机基础动力优化设计发展第二阶段的重要标志是“动力机器基础设计规范”的颁布和实施。“动规”十分明确地提出了基础的选型原则;“动规”中首先强调“汽轮发电机组的框架式基础宜按空间多自由度力学模型进行多方案分析,合理地确定框架的型式和尺寸”,同时指出在一般情况下基础选型可按“顶板应有足够的质量和刚度,在满足强度和稳定性要求的前提下宜适当减小柱的刚度,结合地基的刚度综合分析、并确保底板有一定的刚度”。应该说:动规提出的基础选型原则较“轻型基础”的概念更为准确的、全面的揭示了基础动力优化设计的内在规律;依据“动规”提出的原则和方法,建成了一批经过运行实践证明其动力性能良好的基础,沙岭子电厂 300MW 机组的汽机基础就是一个明显的例子,该厂 300MW 机组系东方汽轮机厂、电机厂生产,汽机基础由华北电力设计院设计,在基础设计前期,制造厂给予大力支持,充分了解基础设计的需求,设计院与制造厂密切配合,反复协商,按我国“动规”的思路,完成了十余个方案的动力计算分析,从中选出动力性能较好的基础设计方案,完成了施工图设计,建成后,运行情况良好,并进行了系统的基础振动实测,证明基础具有良好的动力性能,同时进一步论证了“动规”的选型原则是正确的。

为适应电力工业形势发展的需要,我国从不同国家引进了汽轮发电机组,特别是 80 年代从美国西屋公司引进了 300MW、600MW 汽轮发电机组制造技术,同时引进了美国的汽轮发电机基础的设计技术,而美国的汽轮发电机基础的计算方法和选型原则与我国“动规”差别很大,以前述国产 300MW 机组、按我国“动规”设计的汽轮发电机基础与按引进技术制造的 300MW 机组(常称引进型机组)、并按美国的选型原则设计的汽轮发电机基础作一对比(见下表),就可看出其差别之大。

基 础	基 础 总 重	基础柱面积总和	最大单柱面积
300MW 引进型	4653t	63.58m ²	3.5×3.3=11.55m ²
300MW 自行设计	3060t	26.04m ²	2.1×1.4=2.94m ²

客观上就造成了各种不同风格、各种类型的汽机基础同时存在的局面,表面上看这种不同风格的汽机基础都能保证机组的正常运行。这种现象引起了很多人的思考,到底什么样的基础动力性能好、有利于机组长期安全运行?从某种意义上来说,我们通过长期的理论研究、设计、运行实践得出的关于汽轮发电机基础动力优化设计的结论又面临新的挑战。就在这样的背景条件下,华北电力设计院、大连理工大学、电力建设研究所等一批有志者在各级领导的支持下继续组织起来,进入汽轮发电机基础动力优化设计研究的第三阶段。课题组立意借助现代科学技术特别是计算技术的发展,在更高层次上开展汽轮发电机基础动力优化设计研究。自 1988 年开始,通过近十年的艰苦工作,取得了较好的成果,达到了预定的目标。本课题主要进行了如下工作:

(1) 基于提高机组运行安全性及降低基础造价的要求,以减少结构自重和结构动响应幅值为目标,建立了汽轮发电机基础优化设计的多目标优化设计数学模型;

(2) 针对汽轮发电机基础动力优化设计问题,同时考虑了基础构件尺寸和节点位置两类设计变量,在形状优化和尺寸优化混合的较高层次上实现了基础结构型式的优选和构件尺寸的优化;

(3) 在提出多自由度结构动力响应灵敏度半解析求解方法的基础上, 提出了新的方法, 在程序系统中实现了动力响应对结构尺寸和结构形状设计变量的灵敏度分析的有效算法; 并在程序系统中实现了动力优化问题的序列线性规划算法, 采用一系列行之有效的方法对优化模型和优化算法进行了改进。

(4) 用开发的动力优化程序, 对各种类型(几乎涉及到建成的各种容量及具有特点的各种基础)的汽轮发电机基础进行计算分析, 对模型试验的结果与动力优化趋势进行对比, 按顶层纵、横梁、柱子、中间平台、底板分别计算其控制点振幅的灵敏度, 对过去实践中遇到的一些现象, 借助结构动力优化理论的突破, 通过大量动力优化分析, 在更高层次上对涉及汽轮发电机基础动力特性的一些问题作出解释, 进一步探讨汽轮发电机基础动力特性的内在规律。

主要研究成果体现在下述几个方面:

(1) 针对汽轮发电机基础动力优化问题建立了多目标优化设计模型。该模型在优化目标函数的构造和设计变量的选取上, 较好地反映汽轮发电机基础结构设计实际问题的特点, 也具有较好的可行性和可解性。

(2) 在对灵敏度分析的半解析方法进行了深入研究的基础上, 提出了动力响应灵敏度分析的振型空间法、振型空间加速算法、李兹空间法、直接迭代法等方法, 并以汽轮发电机基础结构为分析对象, 对上述方法的计算精度和计算效率进行了综合比较, 在此基础上确定了以振型空间法作为程序系统中动力响应灵敏度分析的算法。

(3) 对优化目标函数的构造进行了探讨, 将 $K-S$ 函数引入了目标函数, 不但使目标函数成为可微函数, 而且在目标函数中同时考虑了多个具有较大振幅的抗力点, 使得同时降低多点的振幅成为可能。

(4) 开发的汽轮发电机基础动力优化程序系统, 反映了本课题理论研究工作的成果, 采用了一系列行之有效和较为成熟的算法, 遵照我国《动力机器基础设计规范》的规定, 能够完成汽轮发电机基础动力优化问题的数值求解。程序能够为科研和工程直接使用。

(5) 大量的研究, 计算分析, 在更高层次上进一步验证了我国“动力机器基础设计规范”规定的基础选型原则的正确性, 即基础的顶板(纵、横梁)应有足够的质量和刚度, 基础的柱子在满足强度和稳定性要求的前提下宜适当减小刚度, 基础的底板应有一定的刚度。使在我国已取得成功实践经验的“轻型”汽轮发电机基础的选型在理论上得到了进一步的证明。

“动规”中强调:“汽轮机组的框架式基础宜按多自由度空间力学模型进行多方案分析, 合理地确定框架的型式和尺寸。”在实际工作中要真正做到这一点难度很大, 现在, 就可依据本课题的研究成果, 通过开发的程序进行计算, 对多方案进行自动搜索, 寻找框架式基础的合理型式及基础各杆件的断面尺寸达到合理的匹配, 以确定基础动力性能最优的方案。

应该说: 汽轮发电机基础动力优化设计研究第三阶段取得的成果十分可喜, 我们在发展汽轮发电机基础更为理性、系统、科学的设计方法方面又前进了一大步。

1999 年 9 月, 国家电力公司委托电力规范设计总院组织鉴定委员会对研究成果进行