

分类号 TU352.2

学号 1301240122

西安建筑科技大学

学位论文

风荷载作用下输电塔结构 MATLAB、ANSYS

联合主动控制数值模拟研究

作者 高铭尚

指导教师姓名 朱军强 副教授

申请学位级别 硕士 专业名称 防灾减灾工程
及防护工程

论文提交日期 2016.06 论文答辩日期 2016.06

学位授予单位 西安建筑科技大学

答辩委员会主席 _____

评 阅 人 _____

声 明

本人郑重声明我所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：高铭尚

日期：2016.6.20

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存学位论文。

（保密的论文在论文解密后应遵守此规定）

论文作者签名：高铭尚

指导教师签名：

朱军强

日期：2016.6.20

本人授权中国学术期刊（光盘版）杂志社、中国科学技术信息研究所等单位将本学位论文收录到有关“学位论文数据库”之中，并通过网络向社会公众提供信息服务。

因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，同意在☐一年/☐两年/☐三年以后，在网络上全文发布。（此声明处不勾选的，默认为即时公开）

论文作者签名：高铭尚

指导教师签名：

朱军强

日期：2016.6.20

风荷载作用下输电塔结构 MATLAB、ANSYS 联合

主动控制数值模拟研究

专 业： 防灾减灾工程及防护工程

硕 士 生： 高铭尚

指导教师： 朱军强 副教授

摘要

随着经济的不断发展，工业建设和社会发展对电力网络的需求和依赖性也是越来越强。输电塔架作为电力输送中的重要组成部分，保证其安全稳定工作具有非常重要的现实意义。输电塔架是用角钢和圆钢管等搭建起来的格构式结构，属于高耸结构的一种类型。在风荷载作用下，非常容易发生破坏甚至倒塌事故，因此有必要对风荷载作用下的输电塔架结构采取必要措施进行有效控制。本文采用线性二次型最优控制 LQR(Linear Quadratic Regulator)主动控制算法，对 MATLAB 和 ANSYS 有限元分析软件进行二次开发，完成输电塔架结构主动控制数值模拟，本文的主要研究工作有以下几个方面：

1. 分析了风荷载的基本特性，包括平均风的特性和脉动风的特性。并介绍了风荷载模拟的方法——谐波叠加法和线性滤波法及其计算中的要点。
2. 基于对风荷载特性和模拟风荷载方法的分析，采用 MATLAB 软件编程，应用线性滤波法模拟了输电塔架不同高度处的风荷载时程；根据有限元分析理论和有限元建模方法，利用有限元软件 ANSYS 15.0 建立了自立式输电塔架结构有限元模型。
3. 基于现代状态空间模型理论建立了输电塔结构的振动控制状态方程，分析了采用 MATLAB 编程实现 LQR 最优控制算法的过程，在此基础上提出针对高耸复杂结构采用 ANSYS 和 MATLAB 联合实现主动控制的方法。
4. 通过应用 APDL 和 MATLAB 语言对 ANSYS 和 MATLAB 软件进行二次开发，并联合使用两种软件计算对风荷载作用下的输电塔架结构主动控制数值模拟

分析。

通过本文分析可以看出：使用 ANSYS 和 MATLAB 软件并行计算，对输电塔结构进行主动控制，可以实现较好的控制效果，有效地控制了输电塔结构在风荷载作用下的位移响应变化和速度响应变化，达到了主动控制的目的。

关键词：输电塔；主动控制；风荷载；MATLAB；APDL

论文类型：应用研究

The Study on active control of transmission tower structure under wind load which based on the combination of MATLAB and ANSYS software

Specialty: Disaster Prevention & Reduction Engineering

Name: Gao Mingshang

Instructor: Zhu Junqiang

ABSTRACT

With the development of economy, the demand and the dependence of the industrial construction and social development to the electric power network is more and more strong. Transmission tower as an important part of power delivery, to ensure the security and stability of their work has an important practical significance. Transmission tower structure with circular steel pipe and angle iron to build up lattice structure, is a type of high-rise structures. Under the action of wind load, Transmission tower is very prone to damage or even collapse of the accident. Therefore, it is necessary to take some measures against the wind load. In this paper, we simulate the active control of the wind-induced response transmission tower structure, which is carried out by applying a secondary development program of MATLAB and ANSYS finite element analysis software, as well as linear quadratic optimal control LQR (Linear Quadratic Regulator) active control algorithm. The main research work of this paper are as follows aspect:

1. The basic characteristics of wind loads are analyzed, including the average wind characteristics and the characteristics of the fluctuating wind. The method of wind load simulation, harmonic superposition method, linear filter method and the key points in the calculation are introduced.

2. Based on the analysis on the characteristic of wind load and wind load simulation method, we simulate the transmission tower wind load time history at different heights

by using MATLAB software programming and application of linear filter method. According to the theory of finite element analysis, we establish the self-supporting transmission tower structural finite element model by finite element analysis software ANSYS 15.0.

3. Based on the theory of modern state space model, we establish a vibration control equation of state on transmission tower structure and analyze using MATLAB programming to achieve the process of LQR optimal control algorithm. And then we propose a joint implementation method by using ANSYS and MATLAB software to realize the active control for high-rise towers and complex structures.

4. Using APDL language and MATLAB language fulfills the secondary development of ANSYS and MATLAB software. Then accomplish the active control on wind-induced response transmission tower structure by this strategy.

Through this analysis show that: ANSYS and MATLAB combined with the calculation of transmission tower structures active control can achieve better control effect, reducing the transmission tower displacement and velocity changes under wind loads effectively, to achieve the purpose of active control.

Keywords: transmission tower; active control; wind load; MATLAB; APDL

Type of Thesis: Application fundamental research

目录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 课题研究意义	2
1.3 研究现状	4
1.3.1 风荷载及风振响应研究现状	4
1.3.2 输电塔振动控制研究现状	6
1.4 本文主要研究工作	7
2 风荷载的特性及风荷载模拟方法	9
2.1 引言	9
2.2 风荷载的基本特性	10
2.2.1 基本风速和基本风压	10
2.2.2 平均风特性	14
2.2.3 脉动风特性	17
2.2.4 脉动风速的空间相关性	19
2.3 风荷载数值模拟方法	20
2.3.1 谐波叠加法	21
2.3.2 线性滤波方法	23
2.4 本章小结	25
3 建立输电塔有限元模型及风荷载模拟	27
3.1 前言	27
3.2 有限单元法及 ANSYS 软件	27
3.2.1 有限元法的概念	27
3.2.2 有限单元法的基本理论	27
3.3 建立输电塔有限元模型	30
3.3.1 模型简介	30
3.3.2 输电塔结构模型	31
3.4 输电塔结构的风荷载模拟	33
3.4.1 脉动风速的数值模拟	33
3.4.2 输电塔风荷载的模拟	41

3.5 本章小结	44
4 基于 ANSYS 软件的输电塔主动控制模拟	47
4.1 前言	47
4.2 现代控制理论	48
4.2.1 状态空间模型的基本概念	49
4.2.2 结构振动控制系统的状态方程	49
4.3 主动控制系统及 MATLAB 控制过程实现	50
4.3.1 主动控制系统组成及减振机理	50
4.3.2 最优控制	53
4.3.3 线性二次型经典最优主动控制	55
4.3.4 主动控制算法的 MATLAB 实现过程	58
4.4 基于 ANSYS 软件的实时跟踪状态主动控制	58
4.4.1 ANSYS 和 MATLAB 联合实现主动控制	58
4.4.2 APDL 参数化设计语言	60
4.4.3 ANSYS 和 MATLAB 联合计算分析过程及要点	60
4.4.4 ANSYS 和 MATLAB 联合实现输电塔结构风振主动控制	63
4.5 本章小结	79
5 结论与展望	81
5.1 本文的主要工作与结论	81
5.2 研究展望	82
致谢	83
参考文献	85

1 绪论

1.1 引言

随着国民经济的迅速发展,科学技术的进步,我们对电力和电网的需求也越来越大。为了使能源和电力的供应能满足经济发展的需求,国家先后提出了“西电东输”、“北电南送”的发展战略以满足电力需求。电力产业作为经济建设和人民生活的基础产业,现在的建设步伐已经越来越快。为了国计民生以及国家安全,保障电网的安全稳定运行以及可靠安全供电尤为重要。作为传输电能的载体,输电塔结构是电网的重要组成部分,它能否在外界随机干扰作用下,不发生大的变形并保持结构稳定,关系到整个输电网络的安全运行,更是直接关系到人民生活和国家安定。所以保证输电塔结构的安全稳定以及对大变形的防范控制对保障日常生活和社会建设的稳定发展具有非常重要的现实意义。

由于早期电力输送电压不高^[1],设计荷载考虑的比较小,所以早期建设的输电铁塔只要使用角钢材料就可以满足受力要求了。随着电网升级和标准提高,输电塔架面临着越来越复杂的结构承载能力要求以及结构稳定性要求,早期的截面形式已经不能满足现在的需求了,现在使用的一般都是热轧等肢角钢以及热轧圆钢管等截面形式的材料。现在使用的输电塔较之前也有了升级改造,比较常用的是螺栓组装成的钢管组合塔结构以及钢管塔结构等。所用钢材一般为 Q235 和 Q345 碳素结构钢,对于特殊环境承载要求的,可以根据需要选用一些进口材质的钢材。

按照结构特点和组合方式不同,输电塔结构可分为自立式和拉线式两种形式,如图 1.1 所示。对于拉线式输电塔结构,其能否在外界随机干扰下保持结构稳定,主要是看和地面基础相连接的拉线能承受多少拉力。而对于自立式输电塔结构,它的平衡稳定主要是看四个塔腿下面的深基础。通过对两种结构形式的比较可以发现,自立式输电塔结构相较于拉线式输电塔结构有占用地面面积少,结构杆件空间组合样式丰富等特点。而且实际应用中也发现,自立式输电塔架比拉线式输电塔架具有更强的空间整体稳定性。因此,在现阶段的电网建设中,自立式结构的输电塔应用更为广泛。

输电塔架的结构形式和一般常见的钢结构不同,其主要由主材和一些斜杆交叉组合而成,因为这样的结构特点,所以一般是把输电塔结构认为是空间杆系结

构，而且一般输电塔结构的高度比较高，所以其还属于是高耸结构的一种类型。这种形式的结构特点决定了输电塔的侧向刚度比较小，是属于轻质高柔，小阻尼，自振频率低的一种高耸结构。所以，输电塔结构对风荷载作用很敏感，当其受风荷载影响时，结构响应非常激烈，往往很容易发生破坏以及甚至倒塌事故，对社会和人民生活造成严重影响。

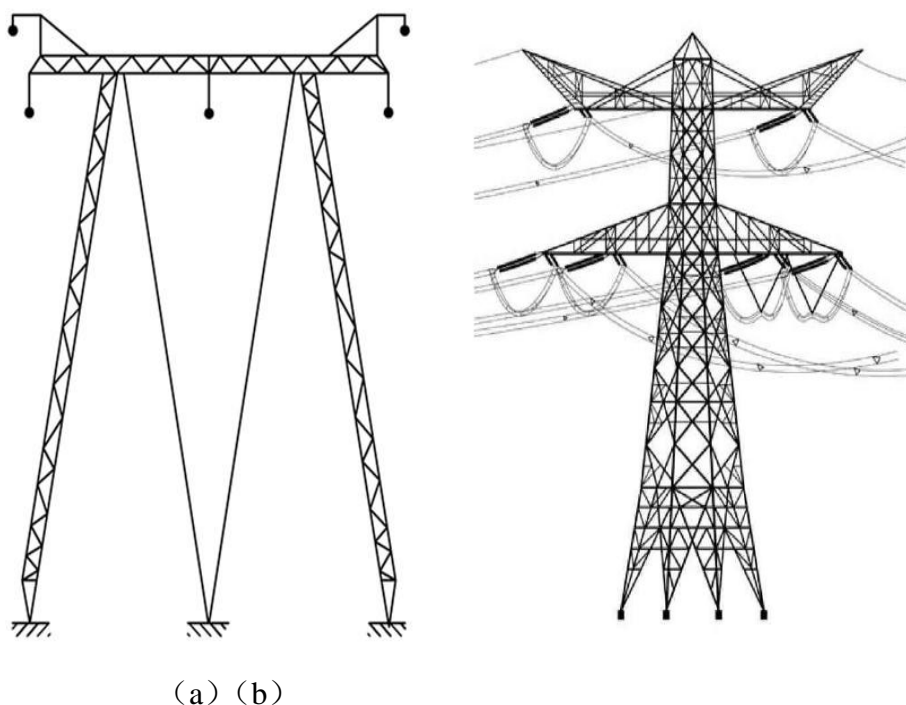


图 1.1 拉线式输电塔和自立式输电塔

(a) 拉线式输电塔；(b) 自立式输电塔

1.2 课题研究意义

输电塔的高柔特性决定了在绝大多数情况下风荷载是输电塔结构设计时需要考虑的主要因素。随着电力工业不断发展，输电塔正日益向着更高、更轻、更柔的方向发展，这样的发展趋势将导致输电塔的侧向刚度对风荷载愈加敏感，发生风致破坏的可能性愈高。所以，现在风致输电塔破坏已然成为造成输电塔破坏乃至倒塌的主要原因。

电力工程的建设已经持续了很多年，许多已建设好的电网已经投入使用。在使用过程中，由于受到强风干扰作用而发生输电塔破坏、倒塌的事故多年来一直在不停的发生。1992 年、1993 年华南某地区因受大风影响连续两年发生了输电塔的倒塌破坏事故，其中最严重的一次连续倒塌 7 座基塔，给当地造成了巨大的经

济损失；2000 年由于龙卷风的影响^[2]，吉林省德惠市一次性倒塌了 10 座输电塔；在 2005 年 4 月，江苏盱眙的一同塔双回路 500KV 双江线也发生了风致倒塌事故，一次倒塌 8 基，给当地居民造成了很大的不便以及巨大的经济损失；2007 年 7 月 21 日，重庆南岸区的输电线路受到狂风袭击^[3]造成南岸区一半以上的电线损坏，当地 40 万人生活和工作受到影响，如图 1.2 所示。

在其他国家，比如美国，日本等每年也会有大量的此类事故发生^[4]。根据日本电力安全部门统计分析得出的结果表明，在电力供给故障中，由于输电线路引起的故障占到百分之七十多，而这些故障大部分都是因为输电塔受到风荷载的破坏作用导致的。还有，日本 1999 年 9 月 24 号在九州地区登录的十八号台风造成了数座输电塔的倒塌，如图 1.3 所示。在 2005 年的美国，飓风“威尔玛”和飓风“卡特丽娜”造成了数座输电塔的破坏，这次事故造成了数百万户美国用户停电。由此可见，由风荷载引起输电塔破坏和倒塌事故所造成的损失非常巨大，同时对人民生活造成非常大的影响。因此，我们应该对输电塔结构的风振响应进行有效控制，加强输电塔架结构的安全性，确保在风荷载作用下输电塔架结构能安全稳定的运行。所以，关于输电塔风振控制研究工作具有十分迫切的现实意义和重要的理论以及经济价值。



图 1.2 重庆南岸区某输电塔发生风致倒塌



图 1.3 日本台风中倒塌的输电塔

1.3 研究现状

1.3.1 风荷载及风振响应研究现状

关于风荷载的研究，最早可以追溯到 18 世纪。在 1759 年，Smeaton 在设计一构造物的时候想到需要考虑风压的问题^[5]，这是根据记录第一次出现风荷载的概念。可是当时的人们对风荷载是没有什么概念的，也没有引起足够的重视。直到 1879 年特（Tay）桥事件，才使人们对自然界的风产生足够的重视，从此便开始了关于风的研究^[6]。有关风的研究经历过很多变化，早期的研究人员一直是把风产生的作用当做静力荷载来研究的，直到 1940 发生了著名的塔科马（Tacoma）大桥事件，大家恍如大梦初醒，才认识到原来过去对风荷载研究的方向是不正确的，风荷载其实是对结构物产生风振作用的，此后关于风荷载的理论研究又发展了很多年。直到上个世纪的 60 年代初期，A.G Davenport^[7-9]教授提出应该把概率统计方法引入到风荷载的研究和风振研究中，风荷载的研究工作又有了新的进展。同时 Davenport 教授还提出了阵风荷载因子法以及等效风荷载的概念，这使人们对风荷载又有了更加深入的认识，同时这些理论为结构的风振响应研究奠定了一个良好的基础。

目前在学术界内对风荷载的认识普遍是这样的：即是对结构作用的风荷载分为两部分，一部分是看做对结构产生静力作用的平均风荷载，另一部分看做对结构产生动力作用的脉动风荷载。

关于风荷载作用下结构的风振响应研究主要有以下分为四种方法，即现场实

测法，风洞试验法，数值风洞法以及理论研究等。现场实测方法一般是针对比较重要的特殊结构采取这种方式进行实验，因为这种实验花费高昂，成本代价太高，所以实际中使用这种方法的非常少。风洞试验方法相较于现场实测而言较为经济，是进行理论研究的辅助手段，其一般是针对于造型复杂，结构特殊的建筑确定风荷载大小而进行的试验，因为关于这些造型复杂的建筑物是没有现成的资料和规范来指导计算其荷载值大小，以及风荷载体形系数的。在这种情况下，就只能通过对这类建筑物比例缩尺，利用风洞试验进行测试来确定结构所承受的风荷载。数值风洞技术是自 20 世纪 80 年代以来，在风工程领域新兴起的一种研究方法。这种方法是通过采用计算流体动力学的方法^[10](Computational Fluid Dynamic, CFD) 在计算机上把结构周围的风场变化通过计算机软件给模拟出来，然后再计算出结构表面的风荷载大小。通过这种方式模拟出的风场及计算出的风荷载，相当于是 在计算机上实现了结构风洞试验，这种实现方式相对于真实的风洞试验的花费，是非常经济的。如果把这种风荷载模拟研究方法应用在建筑结构风振响应分析计算上，将会有非常广阔的应用前景，现在关于这一领域的研究探索已经开始，可是具体应用在结构上尚需要继续发展。

风荷载作用下结构振动响应的理论研究主要集中在频域法和时域法两种范围内^[9]，频域法是把试验或者风速记录仪得到的风速时程使用傅里叶变换的方法转换为风压谱，然后再使用动力传递系数把风压谱通过计算转化成结构动力反应谱，对于结构风致动力响应可以通过使用反应谱积分可以得到。这样，就把得到的随机风速时程通过计算转化为了结构动力响应，使两者之间建立了直接关系。对于时域法就是把得到的随机风速时程通过离散化的方法转换变成关于时间的函数，再使用数学求解器求解这个运动微分方程，得到结构风振响应，这样的分析方法称为时域法，通过这样的方式可以实时准确的了解结构在风荷载作用下的响应状况。

目前最常用的两类人工模拟风速的方法是线性滤波法和谐波叠加法。其中线性滤波法是模拟空间多个点脉动风速常用的方法，这种方法可以使得计算速度大大提高。1987 年 Iannuzzi 和 Spinelli^[12]对桅杆结构在不同方法得到的风速时程作用下的结构响应结果做出比较后，建议采用 AR 法模拟互相相关的多重脉动风速时程；谐波叠加法是一种有效的模拟脉动风速时程的技术，该模拟技术数学理论严密、技术简单易懂、应用范围较广、且模拟效果也很好，但是在模拟多维风速时程或复杂结构风速时程时，计算量超大、计算过程复杂。1994 年王之宏^[13]考虑了互功

率谱中的共谱及重谱的影响，然后根据余弦级数求和的方法模拟了脉动风速。

1.3.2 输电塔振动控制研究现状

结构振动控制是由土木工程和控制技术两门学科结合产生的一种方法。控制技术是属于各种工业生产相互共通而又在实践中普遍应用的一种技术，后来在结构工程中得到了广泛的应用，并取得了很好的效果。作为控制工程领域中的一个重要的组成部分，结构振动控制技术的研究开始于 20 世纪 50 年代，在 80 年代开始得到蓬勃发展。结构振动控制技术现在已经成为提高结构安全性能，改善结构受力性能的主要方法之一，越来越多的专家学者开始进入这一领域进行研究，关于结构控制领域的研究一直都是科研中热点问题。

主动控制和被动控制是结构控制领域最常用的两种控制方法，有时根据使用要求，也会采用混合控制策略。由于实现方法和结构装置布置都比较简单，而且不需要提供外界能源，被动控制方法已经得到很普遍的应用。随着科技的不断发展以及人们对结构的功能、便利性和舒适性的追求变得越来越高，再加上现代结构逐渐趋于轻量化的特点，仅仅采用被动控制已不能满足人们的需求，现在的研究主要集中在主动控制和混合控制方面。

结构振动控制的思路就是，在结构上布置一些控制结构振动的装置，使结构在受到外界干扰的时候，这些安装在结构上的控制装置能够根据结构地反应及时做出反馈控制，并发出作用力，使结构的振动响应幅度变的很小或者尽量维持平衡。根据结构采用反馈方式的不同和采用控制策略的不同来区分是主动控制还是混合控制。总之，现在关于结构的振动控制已经不再是仅靠结构自身的刚度和质量来抵抗外界干扰，是需要外界能源输入的一种控制方式。

目前关于结构振动控制技术的研究主要集中在房屋建筑中，对于在输电塔架这种杆塔类高耸结构中的应用起步较晚，不过现在也已经有了一些研究成果。

首先，对输电塔结构进行风振作用研究分析，是属于动力学范畴的计算分析，建立准确的结构模型对分析是很关键的，三峡大学的张龙^[14]利用 ANSYS 建模平台，采用杆、梁组合体系建立了输电塔的有限元模型，为输电塔在风荷载作用下以及其他外界干扰下作用计算分析提供了模型参考。邓洪洲，傅鹏程^[15]等以不同类型、不同高度输电塔为原型，建立空间有限元模型，利用模态分析研究输电塔结构的动力特性，计算出结构第 1 自振周期及其振型，以实测所得的周期估算公式为基础，经过修正得出较为精确的输电塔结构第 1 自振周期近似计算方法和细化后的

结构第 1 振型系数。关于风致振动控制计算中风荷载的模拟，同济大学的邓洪洲和张永飞^[16]等基于 MATLAB 计算软件模拟出了用于输电塔分析的风荷载风速时程，并利用模拟出的风荷载对结构风振响应做出了研究，研究表明风场湍流强度和结构的阻尼比对结构的风振响应是有不同的影响的，应该在计算时对两种作用综合考虑，同时研究中对我国规范和美国规范关于风振系数的取值进行对比，发现我国采用的风振系数过于保守，没有美国规范推荐采用的系数大。关于输电塔的具体破坏分析也有过相应研究，武汉理工大学的瞿伟廉教授和王亮^[17]对输电塔结构的风致倒塌破坏进行相关分析，研究发现，输电塔的破坏大多数是发生在输电塔塔身的中下部，破坏形态为杆件受压失稳破坏，并指出这种研究发现和国外的研究成果是一致的。在振动控制仿真分析方面，山东大学的王骞和侯和涛副教授^[18]采用调谐质量阻尼器对风荷载作用下的输电塔线体系进行了结构振动控制数值模拟研究，取得了很好的控制效果。广州工业大学的秦佳俊^[19]等利用 ABAQUS 软件对自立式鼓型直线塔输电塔线体系建立模型，并对其在风振和覆冰作用下的动力响应进行了分析，指出了风振和覆冰对结构的运行和破坏均产生很不利的影响。孔伟，代晓光^[20]等对风荷载作用下的输电塔体系体系设置粘弹性阻尼器，并用 SIMULINK 环境对其进行仿真分析，取得了很好的控制效果。

通过以上分析可以看出，关于输电塔结构振动控制方面，国内外已经有了一定的研究成果，可是关于主动控制的研究还是比较少的，以及现在的这些研究工作主要还是在理论范围进行探讨，缺乏实验数据和现象的验证。

1.4 本文主要研究工作

输电塔结构的安全稳定工作关系到人民生活和社会的稳定，风荷载作用下输电塔结构往往容易发生破坏和倒塌，对其在风振作用下的结构响应进行控制具有现实意义。本文应用 MATLAB 和 ANSYS 并行计算，利用线性二次型最优 LQR(Linear Quadratic Regulator)主动控制算法，对华北电网典型自立式输电塔结构进行了风振响应主动控制模拟分析。主要内容为：

1. 对输电塔结构从材料，选型和受力特点方面进行简单分析，回顾了风荷载的发展历程并对风荷载模拟和风荷载作用下结构风振响应研究方法进行了概述。介绍了结构振动控制方法及其在输电塔风振控制中的应用情况进行说明。明确了进行风振响应控制研究的必要性，明确了本文研究目标。

2. 阐述了风荷载的特性，包括平均风的特性以及脉动风的特性。关于平均风

的研究，介绍了指数风规律和对数风规律及风速风压的转换关系。关于脉动风，介绍了脉动风的空间相关性以及 Davenport 风速谱、Kaimal 谱和 Karman 谱。在此基础上，引入了模拟风荷载的谐波叠加法和线性滤波法，并详细讲述了模拟过程中的要点。

3. 基于平均风和脉动风模拟的理论基础，使用 MATLAB 软件模拟了本文要研究的输电塔结构的风速时程曲线，并将其转化为了风荷载时程，为后文研究工作做好准备。介绍了 ANSYS 15.0 结构建模要求及建模流程，并基于 ANSYS 15.0 建立了输电塔结构的有限元模型，为后文实现控制仿真计算做出准备。

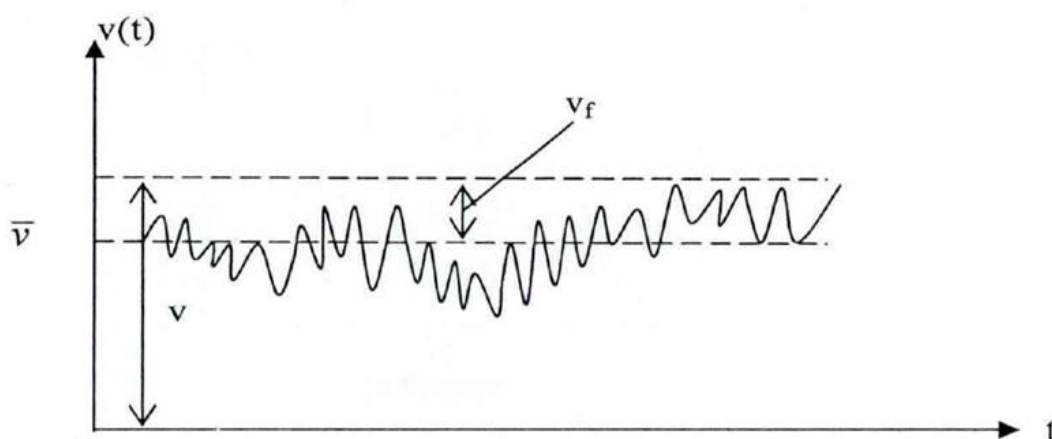
4. 介绍了现代控制理论，建立了状态空间中的结构振动控制方程。阐述了主动控制的减振机理和最优控制的概念以及 LQR 最优控制算法。提出了针对输电塔这种高耸结构的 ANSYS 和 MATLAB 联合并行计算的分析方法，并介绍了 APDL 编程及实现 ANSYS 和 MATLAB 共同计算和计算中数据共享的计算要点。最后采用这种方法，实现了输电塔结构主动控制数值模拟。并对采用这种方法得出的控制效果进行分析，拟通过对无控作用和有控作用下的位移和速度控制效果对比，验证采用这种方法对输电塔风振响应控制的有效性和适用性。

2 风荷载的特性及风荷载模拟方法

2.1 引言

风其实就是空气相对于地球表面的运动。大气层中不同地方的空气因为受到太阳光的辐射不同,吸收的能量不同,而且空气的湿度和密度的分布也是不均匀的,这样就造成了相同高度的两点空气气压不同,产生了压力差,于是就形成了风。空气中压力差大小不同导致形成了风速大小不一的风,压力差大的地方所形成的风就风速大,压力差小的地方形成的风就风速小。在风的流动过程中,当风速为 v 的一股气流在流动的过程中碰到大的结构物阻挡时,这股气流就会在结构物的接触面上形成一层高压气幕^[21]。风速 v 越大,所形成气幕的压力就越大,对结构物产生的荷载也越大。与此同时,在前面已经形成的气幕还会对后面的气流产生一种缓冲作用,结果就是后面继续流动过来的气流风速会越来越小,这样结构物所承受的压力也就会变得越来越小。而当结构物表面形成的气幕压力降低到一定程度的时候,相应的缓冲作用就会变小,那么紧接着的速度较大的气流又会继续加强气幕压力,使得在建筑物上又形成新的高压气幕。风速大大小小不断地变化,使结构物上的气幕压力也在不停地变化,从而使结构物产生往复不断的变形和振动^[22]。输电塔结构属于高柔性的结构物,这种柔性结构对风荷载有一种天然的敏感性,一般情况下,输电塔结构都是在大大小小不同风速的作用下发生强烈振动以致于产生过大变形和疲劳破坏。输电塔设计中,我国是把风荷载作为输电塔结构设计控制荷载考虑的,但是我国现行关于输电塔结构的规程和建筑荷载规范并没有对输电塔所承受的风荷载提出明确的计算规定和数值参考^[23],因此要对输电塔进行风振控制研究,首先需要对风荷载研究以及模拟出风风速时程的方法进行研究,为后面的振动控制研究做好准备工作。

研究发现,自然界流动风的风速其实是由两部分组成的,其中一部分是长周期部分,它的周期通常都在10min以上,这部分风虽然看起来像是动力荷载的性质,但是其实是一种在速度以及方向上基本不随时间变化的稳定风,其性质相当于静力作用,因此在处理的时候就把这部分荷载作为静力荷载来对待;另一部分称为脉动风,脉动风的周期很短,常常只有几秒至几十秒左右,脉动风是属于随机运动的,完全没有任何规律可循的风,实际结构中产生的风振响应就是由这类风引起的,所以它是具有动力作用性质的风,如图2.1所示。

图 2.1 平均风速 \bar{v} 和脉动风速 v_f

2.2 风荷载的基本特性

2.2.1 基本风速和基本风压

根据风速就可以求出风压，进而求出风荷载大小，所以风速是计算风荷载很重要的依据。计算结构风荷载，主要目的是为结构工程师提供设计和计算依据，因此需要的是某一个确定的数值，而不是某一个范围的取值。这是因为结构设计所需要考虑计算的风荷载不是对某一时间有效的，而是要对结构使用期间的任何时候都是有效的，但是根据安装的风速记录仪所记录到的风速是随着不同的季节在变化的，有非常明显的非重现性特征，因此，需要以统计得到的风速数据为样本，应用数理统计的方法对样本数据分析处理，得出一个能够为设计参考使用的风速。同时，统计记录的风速也会受到数据不同收集地的地理位置和环境所影响，不同地貌、不同环境的风速或者风压肯定是存在差别的，为了对不同地方、不同地貌下统计得到的数据有区分和对比，需要对这些不同地区的地貌和测量高度有一个统一的规定，把在这些规定下测得的风速称为基本风速^[24]。

基本风速就是指根据风速记录仪记录收集的不同地方的数据，按照规定的标准条件下记录的数据进行数学分析和处理所得到的关于该地区的最大平均风速。这里的标准条件是指规定的标准高度，地貌，重现期以及概率分布类型^[25]等。

下面就其含义做出以下说明。

1. 标准高度。平均风速是随高度而变化的，受地面摩阻力的影响，越靠近地面，风速能量的损耗就越大，所以愈靠近地表的风速愈小；随着离地面高度的增加，摩擦损失消耗的能量也随之变小，风速就会变的愈来愈大。实际中不可能对

每一个高度的风速取值都有规定，所以需要确定一个标准高度来对各个高度的风速加以度量和换算。由于各地安放风速记录仪的高度一般都是在8米—12米之间，考虑到对风速仪所得数据的方便处理，不用再麻烦的进行换算，因此，我国规范关于标准高度的取值就定义为10米，这样的话，风速记录仪记录下来的风速风压就是基本值，省去了繁琐的换算关系。

2. 地貌。前面讲到，地貌的不同对基本风速的影响会很大。例如在繁华的城市中心，受耸立的高楼大厦影响，地貌就很粗糙，这样对风能的消耗就很厉害，因此城市中心的平均风速就比较小。再比如在海岸附近，多数是海洋粗糙度就很小，因此平均风速就很高。通过这样对比，可以知道在空旷平坦的地方平均风速最高，较小的城市平均风速就会略微降低，大城市中心的平均风速最小。由于粗糙度对平均风速和平均风压的取值有很大的影响，因而很有必要为平均风速的取值设定一个标准参照。我国的荷载规范中把地貌分为A、B、C、D四类，其中B类为标准地貌。标准地貌就是指田野、丛林、乡村这些比较空旷平坦的地貌。

3. 平均风速时距。平均风速时距的取值影响着平均风速的大小，例如把平均风速时距取得很短，例如3秒钟，就会把统计风速最大值附近的很多比较大的数据都计算在其中，这样对于一般水平的风速就很难在其中有所体现，计算出的平均风速就会偏高。如果取得太长，例如一天，这样又会把很多比较小的数据记录进去，造成比较大的数据被平均到了很小的水平，这样得到的平均风速就会很小。可以看出来，定义的风速时距愈短，统计得到的风速值愈大；定义时距取值逾长，统计得到的风速值就愈小。根据风速记录仪统计数据表明，阵风卓越周期基本为10min，所以我国的规范规定以10min作为取值样本，不同国家规范可取不同的值。

4. 最大风速样本。平均风速的取值和最大风速的取值样本也有很大关联，同上类似，若是取日最大风速时程为统计样本，则一年中最大风速出现的那一天，所占的权重只有1/365，这样就会大大缩小真实水平。如果取月最大风速作为统计样本，则一年中最大风速出现的那一天所占权重为1/12，虽然比1/365的权重有所转变，但是对于设计风速来讲，所建建筑结构应该能承受一年中任意日子的极大风速，而且最大风速随着季节变化也会受影响，因此取年最大风速时程为样本，才是最合适的。

5. 最大风速的重现期。由于受气候和环境变化的影响，因此统计得到的每年最大风速肯定都会不同，如果是统计历年最大风速样本的平均值作为设计参考，

那么低于这个数值年份会很少，大于这个数值的年份则会很多。这样统计计算得到的数据过于偏小，也就不能作为设计参考。因此，应该取大于平均值很多的某一个值作为设计依据，这个值一般是间隔一定的时期才会出现的，这个间隔时期叫做重现期。从概率论的角度考虑，重现期是和不超过设计值的保证率有一定的关联关系的^[26]。

设重现期为 T_0 年，超过设计最大风速的概率应为 $1/T_0$ ，所以不大于这个设计最大风速的概率就应该为：

$$P_0 = 1 - \frac{1}{T_0} \quad (2-1)$$

从公式 (2-1) 可以看出，选择的重现期值越长，体现结构安全的保证率就越高。我们国家规范定义重现期为 50 年。

6. 最大风速的概率分布。自然界的风速是有统计规律的，为了求出对设计有参考作用的最大设计风速，我们需要确定统计风速的曲线函数，也就是数理统计中的概率密度函数 $P(x)$ 或者说是概率分布函数 $P(x)$ 。在风荷载研究领域中，概率密度函数称为线型^[27]。我国荷载规范早期采用的皮尔逊 III 型曲线，现在和世界多数国家的类似，改用极值 I 型曲线来描述，极值 I 型分布又称耿贝尔分布，其表达式为：

$$P_1(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-\mu)]\} \quad (2-2)$$

式中，参数 μ 和 α 分别称为位置参数和尺度参数，他们可以由期望 E_x 和根方差 σ 的计算公式，得到：

$$\begin{aligned} E_x &= \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} x dP_1(x) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x de^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\tau}{\alpha} + \mu \right) de^{-e^{-\tau}} \quad (2-3) \\ &= \frac{1}{\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} \tau de^{-e^{-\tau}} + \mu \int_{-\infty}^{\infty} de^{-e^{-\tau}} \\ &= \frac{0.57722}{\alpha} + \mu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - E_x)^2 de^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(x - \frac{0.57722}{\alpha} - \mu \right)^2 de^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \quad (2-4) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\tau - 0.57722}{\alpha} \right)^2 d e^{-e^{-\tau}} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\tau - 0.57722}{\alpha} \right)^2 d e^{-e^{-\tau}}
 \end{aligned}$$

实际上风速的数学期望就是年最大风速的平均值, 即 $E_x = \bar{x}$, 由 (2-3), (2-4) 两式, 得:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{1}{\alpha} = \frac{1.28255}{\sigma} \quad (2-5)$$

$$\mu = E_x - 0.45005\sigma = \bar{x} - 0.45005\sigma \quad (2-6)$$

将 (2-5), (2-6) 代入到 (2-2), 并注意到 $P_0 = P_1(x)$, 得到:

$$x = \bar{x} + \psi\sigma \quad (2-7)$$

$$\psi = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} [0.57722 + \ln(-\ln P_0)] \quad (2-8)$$

所以只要知道 P_0 , 根据式 (2-8), 即可求出保证系数 ψ , 从而由第一式 (2-7), 根据 \bar{x} 和 σ , 即可求出最大风速标准值。

根据上面 6 个条件的分析, 我们可以把我国荷载规范关于基本风速的表述说成是这样, 基本风速系以当地比较空旷平坦地面上离地 10 米高统计得到的 50 年一遇 10min 平均最大风速 $v_0(m/s)$ 。

一般来讲, 由实际测量的记录都是风速时程, 可是对于工程结构设计来讲, 风力作用的大小我们习惯上以风压表示。

下面我们就风速和风压的转换关系进行说明。

一般把流动的空气当做不可压缩的流体看待, 对于作稳定运动的理想流体质点的伯努利方程, 当不可压缩的流体在同一水平线上的时候, 其能量表达式为:

$$\omega_a V + \frac{1}{2} m U^2 = C \quad (2-9)$$

式中： U —沿某一流线的风速；

ω_a —取单位表面积所计算的静压力；

C —常数

V —空气质点的体积；

m —流体质点的质量， $m = \rho V$ ， ρ 为空气质点密度。

两边同时除以 V ，方程变为：

$$\omega_a + \frac{1}{2} \rho U^2 = C_1 \quad (2-10)$$

由上式可知，气流在单位面积上产生的风压力为：

$$\omega = \frac{1}{2} \rho U^2 = \frac{1}{2} \times \frac{\gamma}{g} U^2 \quad (2-11)$$

此即为普遍应用的风速与风压关系公式， γ 是空气容重， g 为重力加速度。

不同地区的地理环境和气候条件均影响风速与风压的关系。在标准大气压情况下、常温 15°C 和绝对干燥的情形下，空气的重度 $\gamma = 0.012018 \text{ KN/m}^3$ ，在纬度 45° 处海平面上的重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，代入上面风速风压换算公式，得到

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} U^2 = \frac{0.012018}{2 \times 9.8} \approx \frac{U^2}{1630} (\text{KN/m}^2) \quad (2-12)$$

这是在标准大气压情况下，满足上面的条件下计算所得的结果。可是由于各个地方地理位置不同， γ 和 g 的相应取值也是不同的。根据统计资料显示，重力加速度 g 是和空气重度 γ 是随着高度、纬度以及气压气温的变化而变化的，所以不同地方的 $\gamma/2g$ 值均是不同的。一般地，在内陆海拔高度 500m 以下的地区，取 $1/1630$ ，海拔高度到达 3500m 的地区，取 $1/2600$ 。

2.2.2 平均风特性

平均风是在给定时间内，风力大小、方向等不随时间改变的量，平均风沿高度的变化规律称为大气边界层风剖面图，如图 2.2 所示，它是平均风非常重要的特

性之一。

地表形态会对风速的流动产生摩擦阻力，一般情况下，在地表处的风速为零^[28]，但是随着高度的增加，地表面的摩擦阻力作用就会逐渐减弱，风速就会随高度增加而逐渐增大。风速增加的快慢，是和地表粗糙度有直接关系的。

这种平均风速随着高度变化的规律一般是有两种表达方式，一种是按边界层理论推导得出的对数律形式的风剖面，另一种是按实测结果推导得出的指数律形式的风剖面。

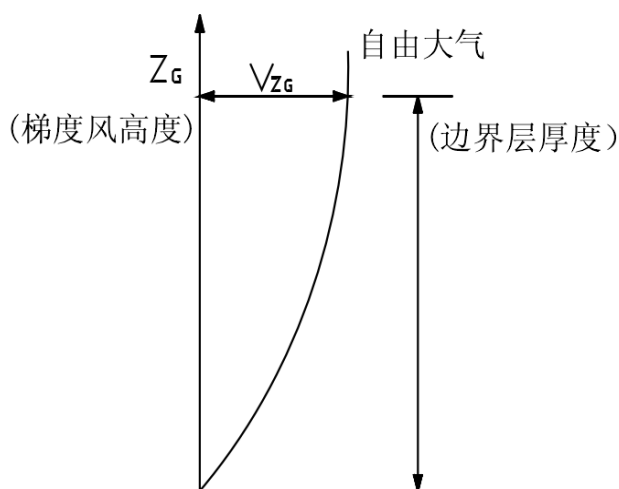


图 2.2 大气边界层风剖面图

1. 对数律风剖面

对数律风剖面是平均风速剖面的重要理论形式，表示大气底层强风风速轮廓线比较理想，对数律的表达式为：

$$\bar{v}(z') = \frac{1}{k} \bar{v}^* \ln \left(\frac{z'}{z_0} \right) \quad (2-13)$$

其中： $\bar{v}(z')$ —边界层中高度为处的平均风速；

\bar{v}^* —摩擦速度或流动剪切速度；

k —卡曼常数；

z_0 —地面粗糙长度；

z' —有效高度；

$z'=z-d$ ， z 为离地高度（m）； d 为零平面高度（m）。

地面粗糙长度一般根据经验取为稍大于地面有效障碍物高度的 $1/10$ 。不同国家对其取值规定也是不同的，有的国家，比如澳大利亚规范对应于四类地面粗糙度做了一个规定，见表 2.1，并且规定 $z_0 = 2 \times 10^{x-4}$ 予以内插，这里 x 为地面粗糙度类别。

表 2.1 澳大利亚规范规定的 z_0 值

地面粗糙度类别	描述	z_0/m
1	有少许或无障碍物和水面的开阔地区	0.002
2	高度为 1.5~10m 的少量分散障碍物的开扩地带、草地	0.02
3	具有大量住宅房屋（3.0~5.0m 高）障碍物覆盖的地面	0.2
4	有大量高达障碍物（大城市中心、大型综合企业）覆盖的地面	2.0

2. 指数律风剖面

在 A.G.Davenport 指数律风剖面发表之前，我们一直使用的是 C.Hellman 提出的指数律风剖面，后来 A.G.Davenport 根据在全世界各处设置风速观测装置收集到的风速信息，经过数学分析提出了另一种形式的变化规律，即平均风速指数律，即下式：

$$\frac{\bar{v}}{v_s} = \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha \quad (2-14)$$

式中： \bar{v} 、 z —任意一点的平均风速和高度（ m ）；

v_s 、 z_s —标准高度平均风速和标准高度；

α —地面粗糙度指数。

由式（2-14）可以得到任一高度的平均风速：

$$\bar{v} = v_s \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (2-15)$$

虽然指数律和对数律两者的计算结果差别不大，但是指数律比对数律计算简便，所以在土木工程设计和计算中，一般采用指数律计算。不同的国家根据各自的国情和实际特点，规定了不同等级地面粗糙度划分标准，同时也规定了标准地面粗糙度和标准参考高度。当已知标准地面粗糙度类别在标准参考高度处的平均风速后，便可以确定任意一种类型的地面粗糙度类别下的平均风速了。

我国关于风荷载的设计规范规定采用指数型^[29]的表达式,下表 2.2 是我国关于四类地面粗糙度以及相应的梯度风高度和指数的规定。在关于风荷载的计算中根据相应的情况选用相应的值。

表 2.2 我国四类地貌下的粗糙度系数和梯度风高度

地貌类型	描述	α	z_G/m
A	近海面、海岛、海岸、湖岸以及沙漠地区	0.12	300
B	指田野、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	0.16	350
C	指有密集建筑群的城市市区	0.22	400
D	指有密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30	450

2.2.3 脉动风特性

脉动风的特性就是指脉动风的风速和风向是随机变化的^[30], 紊乱, 随机是其在时间和空间范围中最明显的特点。结构发生的风振反应现象其实是脉动风中的湍流运动引起的, 湍流是流动的风受到阻碍形成的小涡旋之间相互作用产生的。湍流运动对结构产生的作用不可忽略, 一般采用湍流积分尺度、湍流强度、湍流脉动风速自谱和互谱密度来对其进行描述。

1. 湍流强度

湍流强度是对湍流运动的最直接, 简单的描述, 对于 z 高度的湍流强度为:

$$I_v(Z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(Z)} \quad (2-16)$$

其中, $\sigma_u(z)$ 为 z 高度的脉动风速标准偏差, $U(z)$ 为 z 高度的平均风速。

无量纲的湍流强度也和地面粗糙度和测量点的高度有关。很显然, 湍流强度越大, 意味着气流中的脉动风的成分越多。

2. 湍流积分尺度

通过某一点的气流中的脉动^[31], 一般可以认为是由平均风运送过来的一系列涡旋相互叠加和作用引起的。每个涡旋可看作在那个点所引起的周期性脉动, 其圆频率为 $\omega = 2\pi n$, n 为频率, 类似于行进波。湍流积分尺度是气流中湍流涡旋平均尺寸的量度, 湍流尺度的估算结果主要取决于估算分析所用记录的长度以及记录的平稳程度。

3. 脉动风速功率谱

由于脉动风为随机过程，因此必须采取统计的方法来描述。根据大量风速记录仪统计的风速时程样本研究分析发现^[32]，假如把记录到的随机风速的初始阶段部分去除，可以发现风速是非常符合平稳随机过程特征的，所以如果把平均风的那部分影响除去，脉动风速就能看做是具有零均值的高斯平稳随机过程^[33]，可以通过这种方式来模拟脉动风速。一个随机振动可看做大量数目的具有随机振幅、频率分布从零到无穷大的谐振之和，它的总功率就等于各个谐和分量的功率之和。功率谱密度函数反映了某一频率域上脉动风的能量的大小，是一个重要的统计特性。

(1) Davenport 谱

世界上许多学者根据实测或者风洞试验结果，对风的功率谱密度函数提出了各种各样不同的表达形式，其中最著名的且应用最广的是 Davenport 提出的经验公式，即：

$$S_u(n) = 4kU_0^2 \frac{x^2}{n(1+x)^{\frac{4}{3}}} \quad (2-17)$$

$$x = \frac{L_u n}{U_0}$$

式中， $S_u(n)$ —脉动风速功率谱。

k —地面阻力系数，见下表 Davenport 归纳的 k 值。

U_0 —10m 高度处的平均风速。

L_u —湍流积分尺度，Davenport 常取为 1200m。

因此，Davenport 也可以写成

$$S_u(n) = \frac{2}{3} \frac{x^2}{(1+x^2)^{\frac{4}{3}}} \frac{\sigma_u^2}{n} \quad (2-18)$$

$$\sigma_u = \sqrt{6k}U_0 = \sqrt{6}u_*$$

式中， σ_u —脉动风速的根方差；

u_* —纵向摩擦速度。

从式(2-17)、(2-18)可以看出，Davenport 谱不随高度而变化，所以，之后一些

学者根据实测结果建立了多种与高度相关的纵向谱密度函数,如 Kaimal 谱, Karman 谱等,但是目前包括我国在内的许多国家风荷载规范中采用的都是(2-17)所示的谱。

表 2.3 地面阻力系数

地表面	K 值
河湾	0.003
开阔的草地,种有少量的树	0.005
离把围护的广场	0.008
桉树和 30 呎的高树	0.015
市镇	0.030

(2) 凯曼 (Kaimal) 脉动风速谱

凯曼在 1972 年提出的纵向风速谱的数学表达式为

$$S_u(z, n) = 200u_*^2 \frac{f}{n(1+50f)^{\frac{5}{3}}} \quad (2-19)$$

$$f = \frac{nz}{U(z)} \quad (2-20)$$

$$u_*^2 = \frac{\sigma_u^2}{6} \quad (2-21)$$

式中, f — 无量纲频率。其他符号同前面含义。

(3) 卡门 (Karman) 谱

卡门谱是 1948 年根据湍流各向同性假设提出的,其表达式为

$$S_u(z, n) = 4\sigma_u^2 \frac{x}{n(1+70.8x^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (2-22)$$

$$x = \frac{Lu(z)n}{U(z)} \quad (2-23)$$

式中, $Lu(z) = 100\left(\frac{z}{30}\right)^{0.5}$ 为纵向湍流积分尺度,其余符号同前面。

2.2.4 脉动风速的空间相关性

脉动风还有一个重要的性质，就是在空间上表现出一定的空间相关性。也就是说，由于结构尺度的影响，结构上各个点的风压值彼此之间不可能同时达到最大值或者最小值，即当一个点达到最大值时，一定范围内距离这个点越远同时也达到最大的可能性就越小，这就为脉动风的空间相关性。对于空间上一点 p_i 的风速和点 p_j 的风速的相关性，一般通过互谱函数 $S(p_i, p_j, n)$ 和互相干函数 $Rc(p_i, p_j, n)$ 来描述：

$$S(p_i, p_j, n) = Rc(p_i, p_j, n) \sqrt{S(p_i, n) S(p_j, n)} \quad (2-24)$$

对于空间结构，风速的空间相关性需要考虑到三个方向的相关性，此时的相干函数，Davenport 推荐为

$$Rc(p_i, p_j, n) = \exp \left(\frac{-2n \left[C_x^2 (x_i - x_j)^2 + C_y^2 (y_i - y_j)^2 + C_z^2 (z_i - z_j)^2 \right]^{1/2}}{U(z_i) + U(z_j)} \right) \quad (2-25)$$

式中， C_x, C_y, C_z 为常数，Emil 建议 $C_x = 16, C_y = 8, C_z = 10$ 。可见，相干函数是频率 n 的函数，这在进行频域计算时可能造成不便。因此，一般取 $n = \frac{1}{60}$ ，使得

三向相干函数只与两点的位置有关，此时的相干函数表示为：

$$Rc(p_i, p_j) = \exp \left(\frac{- \left[C_x^2 (x_i - x_j)^2 + C_y^2 (y_i - y_j)^2 + C_z^2 (z_i - z_j)^2 \right]^{1/2}}{30(U(z_i) + U(z_j))} \right) \quad (2-26)$$

式中， $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j)$ 分别为结构第 p_i, p_j 个质点的坐标； $U(z_i), U(z_j)$ 分别为结构第 p_i, p_j 个质点的平均风速。

2.3 风荷载数值模拟方法

要研究结构时域范围内的风振响应控制，就需要对风荷载的模拟方法进行研究，而且所使用的模拟方法应该具有普遍性和有效性并且模拟出的风荷载应该接近自然风的特性。

风荷载可分为对结构产生静力作用的平均风和对结构产生动力作用的脉动风，脉动风时域分析最常用的两种模拟方法是线性滤波法和谐波叠加法。谐波叠加法

是基于三角级数求和并采用离散谱来逼近目标谱的一种离散化的数值模拟方法。

这种方法在计算维数比较大的时候，会非常耗时，但是精度高一些。线性滤波法即白噪声法是应用比较广泛的脉动风速时程模拟方法，此方法是将人工产生均值为零、具有正态分布的一系列随机数输入设计好的过滤器，通过这种设计好的过滤器输出具有目标谱特性的随机序列。这种方法的好处就是计算量相比较于谐波叠加法要少，因此速度就快一些，缺点就是精度没有谐波叠加法好。

2.3.1 谐波叠加法

谐波叠加法（WAWS）的原理是采用一系列具有随机频率的余弦函数序列来模拟脉动风。由于同一时间作用于输电塔结构各个点的风荷载肯定不会是完全一样的，考虑到输电塔脉动风的空间相关性，在模拟风速时就以多个互相关的随机过程来描述。

根据风的实测纪录可看出，风速的脉动部分可以看做是具有零均值的高斯(Gauss)平稳随机过程，对具有不同坐标的各点（1，2，3，…，n），其风速 $u_j(t)$ ($j=1,2,2,\dots,n$) 的谱密度矩阵为：

$$[S(\omega)] = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

由维纳-辛钦（Wiener-Khintchine）关系可知，功率谱密度函数与自相关函数之间存在如下关系：

$$S_{jk}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{jk}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (2-28)$$

$$R_{jk}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{jk}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (2-29)$$

由平稳随机过程的性质可以得出

$$S_{jj}(\omega) = S_{jj}(-\omega) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2-30)$$

$$S_{jk}(\omega) = S_{jk}^*(-\omega) \quad (j \neq k) \quad (2-31)$$

$$S_{jk}(\omega) = S_{kj}^*(\omega) \quad (j \neq k) \quad (2-32)$$

公式中，*表示共轭复数。

可以证明，风速谱密度函数矩阵是非负定的。为了计算上的方便，将功率谱密度矩阵可以分解成如下形式

$$[S(\omega)] = [H(\omega)][H^*(\omega)]^T \quad (2-33)$$

式中上标 T 表示矩阵的转置，上述分解用 Cholesky 分解方法，其中 $[H(\omega)]$ 为下三角矩阵：

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

对于矩阵中的各元素，有如下关系：

$$H_{jj}(\omega) = H_{jj}(-\omega) \quad (j=1,2,\cdots,n) \quad (2-35)$$

$$H_{jk}(\omega) = H_{jk}^*(-\omega) \quad (2-36)$$

$$(j=2,3,\cdots,n, \quad k=1,2,\cdots,n-1, \quad j>k)$$

$[H(\omega)]$ 中的非对角元素也可以写成以下指数形式：

$$H_{jk}(\omega) = |H_{jk}^*(-\omega)| e^{i\theta_{jk}(\omega)} \quad (2-37)$$

$$(j=2,3,\cdots,n, \quad k=1,2,\cdots,n-1, \quad j>k)$$

$$\theta_{jk}(\omega) = \arctan \theta \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jk}(\omega)]}{\text{Re}[H_{jk}(\omega)]} \right\} \quad (2-38)$$

式中，Re 表示复数的实部；Im 表示复数的虚部。

功率谱密度矩阵 $[S(\omega)]$ 分解后，随机过程 $u_j(t) (j=1,2,\cdots,n)$ 可用下式模拟

(当 N 趋于无穷大的时候)

$$u_j(t) = 2 \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{ml}t - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \varphi_{ml}] \quad (2-39)$$

式中：N 为频率域内的数据采集数目；其他项定义如下：

$$\Delta\omega = \frac{\omega_u}{N} \quad (2-40)$$

$$\omega_{ml} = l\Delta\omega - \frac{n-m}{n}\Delta\omega \quad (2-41)$$

$$(m=1,2,\dots,n \quad l=1,2,\dots,N)$$

$$\theta_{jk}(\omega_{ml}) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega_{ml})]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega_{ml})]} \right\} \quad (2-42)$$

用式(2-39)产生的随机样本, 时间步长 Δt 须满足以下公式以免发生频率混淆。

$$\Delta t \leq \frac{2\pi}{2\omega_u} \quad (2-43)$$

式(2-39)用分项形式可表示为:

$$u_1(t) = 2 \sum_{l=1}^N |H_{1l}(\omega_{1l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{1l}t - \theta_{1l}(\omega_{1l}) + \varphi_{1l}] \quad (2-44)$$

$$u_2(t) = 2 \sum_{l=1}^N |H_{2l}(\omega_{1l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{1l}t - \theta_{2l}(\omega_{1l}) + \varphi_{1l}] + \\ 2 \sum_{l=1}^N |H_{2l}(\omega_{2l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{2l}t - \theta_{2l}(\omega_{2l}) + \varphi_{2l}] \quad (2-45)$$

$$u_3(t) = 2 \sum_{l=1}^N |H_{3l}(\omega_{1l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{1l}t - \theta_{3l}(\omega_{1l}) + \varphi_{1l}] + \\ 2 \sum_{l=1}^N |H_{3l}(\omega_{2l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{2l}t - \theta_{3l}(\omega_{2l}) + \varphi_{2l}] + \\ 2 \sum_{l=1}^N |H_{3l}(\omega_{3l})| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{3l}t - \theta_{3l}(\omega_{3l}) + \varphi_{3l}] \quad (2-46)$$

式(2-39)中的 $\varphi_{1l}, \varphi_{2l}, \varphi_{3l}, \dots, \varphi_{ml} (l=1,2,\dots,N)$ 为相互独立的 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机相位角序列。

2.3.2 线性滤波方法

线性滤波法即白噪声法(white noise filtration method)是一种应用广泛的脉动风速时程模拟方法。这种方法的主要理论是将随机过程抽象为满足一定条件的白噪声, 并经某假定系统进行一定的变换后, 再拟合出该过程的时域模型。近年来, 线性滤波法中的自回归模型(AR法)因其计算量小, 速度快广泛用于随机振动和事件系列分析中。

采用线性滤波法(AR法)模拟多维风速时程时, 可由下式生成 N 个相关的风

速时程 $V(X, Y, Z, t)$:

$$V(X, Y, Z, t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k V(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (2-47)$$

式中: $V(X, Y, Z, t - k\Delta t) = [V^1(X, Y, Z, t - k\Delta t), \dots, V^N(X, Y, Z, t - k\Delta t)]^T$; Δt 为模拟脉动风速时所需的时间步长, $N(t) = [N^1(t), \dots, N^N(t)]^T$, $N^i(t)$ 是零均值、具有给定协方差的正态分布随机过程, $i=1, \dots, N$; $[\Psi_k]$ 为自回归系数矩阵, 其矩阵阶数为 $N \times N$, $k=1, \dots, p$, p 为自回归阶数, 由上式可知, 当 $[\Psi_k]$ 和 $[N(t)]$ 求出后, 则可模拟出脉动风速时程曲线。 $[\Psi_k]$ 和 $[N(t)]$ 求解由下列步骤可求出:

(1) 求解自回归系数矩阵 $[\Psi_k]$:

由随机振动理论可知, 相关函数和功率谱密度之间符合维纳—辛钦公式^[34], 即:

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^\infty S_{ij}(\omega) \cos(2\pi\omega \times \tau) d\omega, \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad (2-48)$$

式中: ω 为脉动风的圆频率, $S_{ij}(\omega)$ 在 $i \neq j$ 时为脉动风速的互谱密度函数, 在 $i=j$ 时为脉动风速自谱密度函数, 其确定方法同上文的谐波叠加法中。

对空间任一点 i , 其具有时间差的随机过程 $V^i(t)$ 与 $V^i(t - k\Delta t)$ 的协方差可表示为:

$$R_V^i[k\Delta t] = E\left[\left\{V^i(t - k\Delta t) - E[V^i(t - k\Delta t)]\right\}\left\{V^i(t) - E[V^i(t)]\right\}\right] \quad (2-49)$$

因 $V^i(t)$ 与 $V^i(t - k\Delta t)$ 是均值为零的平稳随机过程, 则 (2-49) 式可写为:

$$R_V^i[k\Delta t] = E[V^i(t - k\Delta t)V^i(t)] \quad (2-50)$$

将 (2-47) 式的等号左右两边同时右乘 $[V(t - k\Delta t)]$, 然后在等号两边均取数学期望, $[N(t)]$ 的均值为零, 且相关函数 $R_V(j\Delta t)$ 是偶函数, 则相关函数与回归系数 $[\Psi]$ 之间的关系可写成:

$$[R] = [\tilde{R}][\Psi] \quad (2-51)$$

式中: $[R] = [R_V(\Delta t), \dots, R_V(p\Delta t)]^T$, $[\Psi] = [\Psi_1^T, \dots, \Psi_p^T]^T$,

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} R_V(0) & R_V(\Delta t) & \cdots & R_V((p-2)\Delta t) & R_V((p-1)\Delta t) \\ R_V(\Delta t) & R_V(2\Delta t) & \cdots & R_V((p-1)\Delta t) & R_V(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ R_V((p-2)\Delta t) & R_V((p-1)\Delta t) & \cdots & R_V((p-4)\Delta t) & R_V((p-3)\Delta t) \\ R_V((p-1)\Delta t) & R_V(0) & \cdots & R_V((p-3)\Delta t) & R_V((p-2)\Delta t) \end{bmatrix}_{pN \times pN}$$

其中,

$$[R_V(j\Delta t)]_{N \times N} = \begin{bmatrix} R_V^{11}(j\Delta t) & \cdots & R_V^{1N}(j\Delta t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_V^{N1}(j\Delta t) & \cdots & R_V^{NN}(j\Delta t) \end{bmatrix}, \quad [\Psi_j]_{N \times N} = \begin{bmatrix} \Psi_j^{11} & \cdots & \Psi_j^{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_j^{N1} & \cdots & \Psi_j^{NN} \end{bmatrix},$$

$j=1, \dots, p$ 。

然后求解式 (2-51) 给出的线性方程组，即可求得回归系数矩阵 $[\Psi_k]$ 。

(2) 求解 $[N(t)]$ ：

在式 (2-47) 等号两边同时右乘 $[V(t)] = [V^1(t), \dots, V^N(t)]$ ，可得

$$[R_N] = [R_V(0)] - \sum_{k=1}^p [R_V(k\Delta t)] \quad (2-52)$$

由上式求出 $[R_N]$ 后，对 $[R_N]$ 进行乔里斯基分解，得 $[R_N] = [L] \times [L^T]$ ，则随机向量 $[N(t)]$ 的表达式为：

$$[N(t)] = [L] \times [n(t)] \quad (2-53)$$

式中 $n(t) = [n_1(t), \dots, n_N(t)]^T$ ； $n_i(t)$ 是均值为零，方差为 1 的正态分布随机向量。

(3) 生成随机风过程：

将 (1) 中求得的 $[\Psi_k]$ 和 (2) 中求得的 $[N(t)]$ 代入式 (2-47) 中，即求出空间 N 个点的脉动风速时程。

2.4 本章小结

本章介绍了风荷载的一些特性，包括基本风速，基本风压，风速的组成，脉动风的特点和平均风的特点。关于脉动风的特点展开讲了湍流强速，湍流积分尺度，脉动风的风速功率谱和脉动风的空间相关性。在此基础上，介绍了风荷载的模拟方法，重点介绍了谐波叠加法和线性滤波法模拟风荷载的方法和计算过程，为后面章节模拟风速时程做好理论准备。

3 建立输电塔有限元模型及风荷载模拟

3.1 前言

在对输电塔的风振响应控制做出研究之前，首先应建立输电塔的有限元模型，模拟出时域范围内的风荷载时程曲线，为后面的控制研究工作做好准备。要想使数值模拟结果反映实际情况，那么所建立的输电塔有限元模型就必须符合实际，所模拟出来的风荷载时程也应符合实际规律。本章应用通用有限元软件 ANSYS 建立了输电塔结构有限元模型，并确定了输电塔结构模拟风荷载时程的位置点；此外，基于前面章节关于风荷载数值模拟的理论分析基础，本章采用兼顾运算速度和准确度的线性滤波法，在时域范围内对风荷载进行了数值模拟。

3.2 有限单元法及 ANSYS 软件

3.2.1 有限元法的概念

有限元法最初被用来研究复杂的飞机结构中的应力^[35]，它是将弹性理论、计算数学和计算机软件有机地结合在一起的一种数值分析技术。后来由于这种方法的灵活、快速和有效性，迅速发展成为求解各领域数理方程的一种通用的近似计算方法。在求解工程技术领域的实际问题时，建立基本方程和边界条件还是很容易的，但是由于几何形状，材料特性和外部荷载的不规则形，很难求得解析解。因此，寻求近似解法就成了必由之路。经过多年探索，近似算法有许多种，但常用的数值分析方法是差分法和有限元法。差分法计算可给出模型基本方程的逐点近似值（差分网格上的点），但是对于不规则的几何形状和不规则的特殊边界条件差分法就难以应用了。

有限单元法把求解区域看作是由许多小的节点处互相连接的子域（单元）构成，其模型给出基本方程的大单元的近似解。由于单元可以被分割成各种形状和大小不同的尺寸，所以无论多么复杂的几何形状，边界条件以及材料特性利用这种方法都可以满足，再加上有成熟的大型软件系统支持，有限元分析已经成为广受欢迎、使用广泛的数值计算方法。

3.2.2 有限单元法的基本理论

有限元理论的基本思路是：“化整为零，积零为整”。求解步骤一般为：将连续

的结构离散成有限多个单元，并在每个单元中设定有限多个节点，将连续体看作是只在节点处相连接的一组单元的集合体；然后选定场函数的节点值作为基本未知量，并在每一单元中假设一个近似的插值函数以表示单元中场函数的分布规律；进而利用力学中的变分原理建立用以求解节点未知量的有限元法方程，从而将一个连续域中的无限自由度问题化为离散域中的有限自由度的问题，求解结束后，利用解得的节点之和设定的插值函数确定单元上以至整个集合体上的场函数。

单元可以设计成不同的几何形状以模拟和逼近复杂的求解域。显然，如果插值函数满足一定要求，随着单元数目的增加，解的精度会不断提高而最终收敛于问题的精确解。从理论上说，无限制地增加单元的数目可以使数值分析解最终收敛于问题的精确解，但是这却增加了计算机计算所耗费的时间。在实际工程应用中，只要所得的数据能够满足工程需要就足够了。有限元分析方法的基本策略就是在分析精度和分析时间上找到一个最佳平衡点。

介绍一些有限元法的常用术语：

(1) 单元，结构的网格划分中的每一个小的块体就称为一个单元。常见的单元类型有线段单元、三角形单元、四边形单元、四面体单元和六面体单元几种。由于单元是组成有限元模型的基础，因此，单元的类型对于有限元分析是至关重要的。

(2) 节点，确定单元形状的点就叫节点，例如线段单元只有两个节点，三角形单元有 3 个或者 6 个节点，四边形单元最少有 4 个节点等。

(3) 载荷，工程结构所受到的外在施加的力称为荷载，包括集中荷载和分布荷载等。在不同的学科中，载荷的含义也不尽相同。在电磁场分析中，载荷是指结构所受的电场和磁场作用；在温度场分析中，所受的载荷就是指温度本身。

(4) 边界条件，边界条件是指结构边界上所受到的外加约束。在有限元分析中，边界条件的确定是非常重要的因素，错误的边界条件使程序无法正常运行，施加正确的边界条件是获得正确的分析结果和较高的分析精度的重要条件。

应用有限单元法分析的一般过程流程如图 3.1 所示，图中指出了分析过程中的主要步骤及其相互关系。

(1) 研究分析结构特点，研究分析所需求解对象的结构特点，包括形状、边界条件、工况载荷等特点；初步建立物理力学模型，包括形状的简化，构件间连接件的简化，支承的简化，材料的简化，截面特性的简化，荷载的分析等。这一步工作的好坏对整个计算影响很大。

(2) 形成有限元计算模型，根据结构的特点，确定单元类型，选取节点，形成网格图，同时选定支承及边界条件以及决定载荷的处理，最终形成计算数据文件。这一步既对选择什么样的软件有影响，又受所选软件的限制和制约。因为选定的所用的软件后，单元类型，单元数据，节点数据，边界与载荷的处理，以及最终的计算的数据文件都要按软件的规定处理。

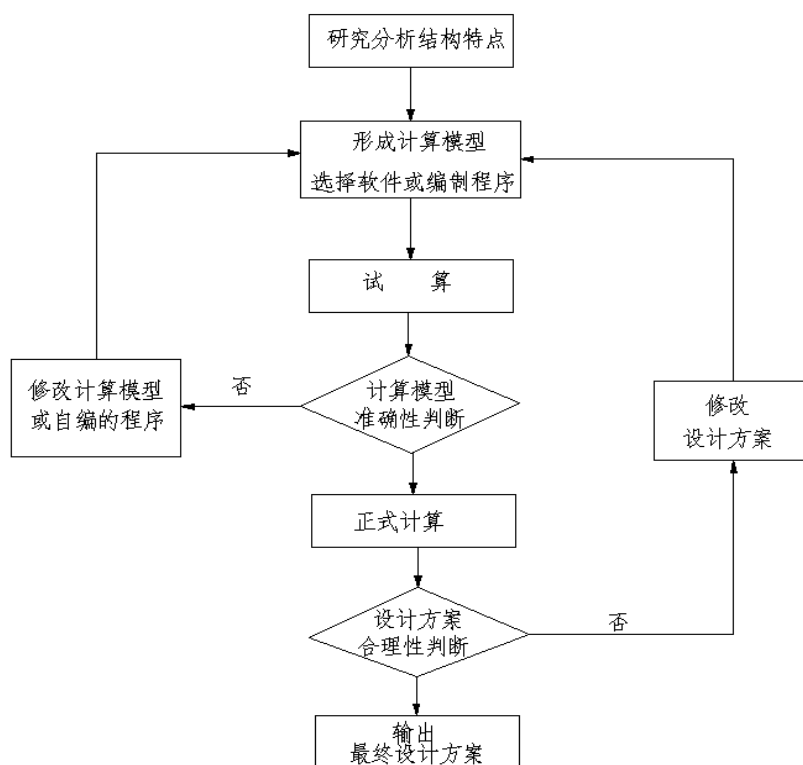


图 3.1 使用 ANSYS 软件建立结构模型流程图

(3) 选择有限元软件或编制计算程序，根据结构的计算模型，选择或者编制有限元计算软件，选定软件后，要根据软件的要求修改计算模型。

(4) 上机试算，为了检验计算模型的正确性，同时熟悉所选定得软件，或者考核新编制的程序，一般要进行试算。试算时可在所形成的计算模型上加单位荷载，确认计算结果正确无误后，方可进入下一步。

(5) 计算模型的准确性判别，试算顺利结束后，一定要根据试算结果判别计算模型是否准确，这是关系到有限元分析是否准确无误的关键。最常用的方法是将计算结果与通过实验测量的结果进行比较，如果两者之间的误差在工程允许的范围内，那么就可以判断出这个模型建立是准确的。判别的其他方法还有，根据理论计算结果（如果存在的话）及常识进行判别，或对同一问题用其他软件计算的结果进行分析比较。

(6) 修改计算模型或修改程序, 当试算结果误差过大时, 应重新修改计算模型^[36], 有时甚至要更新计算模型。修改计算模型可从单元的类型, 节点与单元的划分和边界条件等着手。

(7) 正式计算以及计算结果整理, 通过对修改后的模型再次判断, 若修改后的模型是准确的, 便可以施加载荷, 进入正式计算。计算分析后, 需要对计算结果进行整理, 有时需要提取出变形图, 应力图和振型图等。

(8) 结构设计方案的判别, 根据整理得到的计算结果, 如应力图、变形图等来判断设计方案是否合理。若得出结果的薄弱区域或者强度富裕区域等设计不合理之处, 可对结构进行修改, 并修改相应计算模型, 重新计算, 直至得到最佳方案。

3.3 建立输电塔有限元模型

风振响应振动控制分析时, 模型建立的准确与否对控制效果的影响很大, ANSYS 软件建模功能强大, 在结构工程建模领域应用成熟, 用它建模能较好的反应结构实际情况, 且后文也需要使用 ANSYS 软件进行时程分析, 所以本文采用通用有限元软件 ANSYS 15.0 建立此输电塔的三维有限元模型。

3.3.1 模型简介

本文采用的输电塔架为华北电网 110KV 杆塔典型设计, 此输电塔的档距为 400 米, 呼称高 27 米, 总高度 38.2 米, 其竖向, 横向, 斜撑及塔头横担均为角钢构件, 且角钢截面面积随高度增加逐渐减小, 属于角钢型塔的高柔性结构。采用 Q345 钢和 Q235 钢两种材料, 它们的物理力学性能如下表所示。

表 3.1 输电塔杆件材料的物理力学性能指标

钢材 型号	厚度 (mm)	抗拉压弯曲强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m^3)
Q235	≤ 16	215	2.06×10^5	0.3	7.8×10^3
	16 ~ 40	205			
Q345	≤ 16	310	2.06×10^5	0.3	7.8×10^3
	16 ~ 40	295			

3.3.2 输电塔结构模型

实际输电塔结构各杆件之间的连接一般通过螺栓连接，在对其杆件单元进行模拟的时候，通常为了方便处理采取用 LINK 单元来模拟各杆件，这样的处理是把输电塔结构理解成了桁架结构，认为杆件之间只有轴力，但是实际上结构杆件之间的受力不仅存在轴力，而且还存在剪力和弯矩作用，考虑到这些因素，本文认为应该采用 BEAM4 空间梁单元来模拟各杆件单元，因为 BEAM4 单元既可以模拟沿节点坐标系 x , y , z 方向的平动位移又可以模拟绕 x , y , z 轴的转动位移，这些分别对应三个集中力和三个弯矩的六个节点力，符合实际工况。因此，本文采用 BEAM4 梁单元来模拟结构中的各个杆件。

由于杆件材料的尺寸不统一是随着高度变化而变化的，这样采用 GUI 方式直接建立模型是比较困难的，因此我们采用命令流定义杆件和关键点的方式来建立模型，按照“关键点—杆件—整体模型”的思路建立了输电塔有限元模型，建模流程如图 3.2 所示。

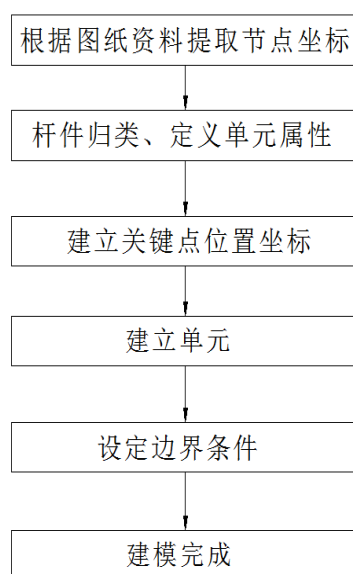


图 3.2 使用命令流建立输电塔模型流程

采用 BEAM4 空间梁单元，用 ANSYS 读取命令流 txt 文件，赋予杆件属性，建立了输电塔结构的有限元模型，如图 3.3 所示。

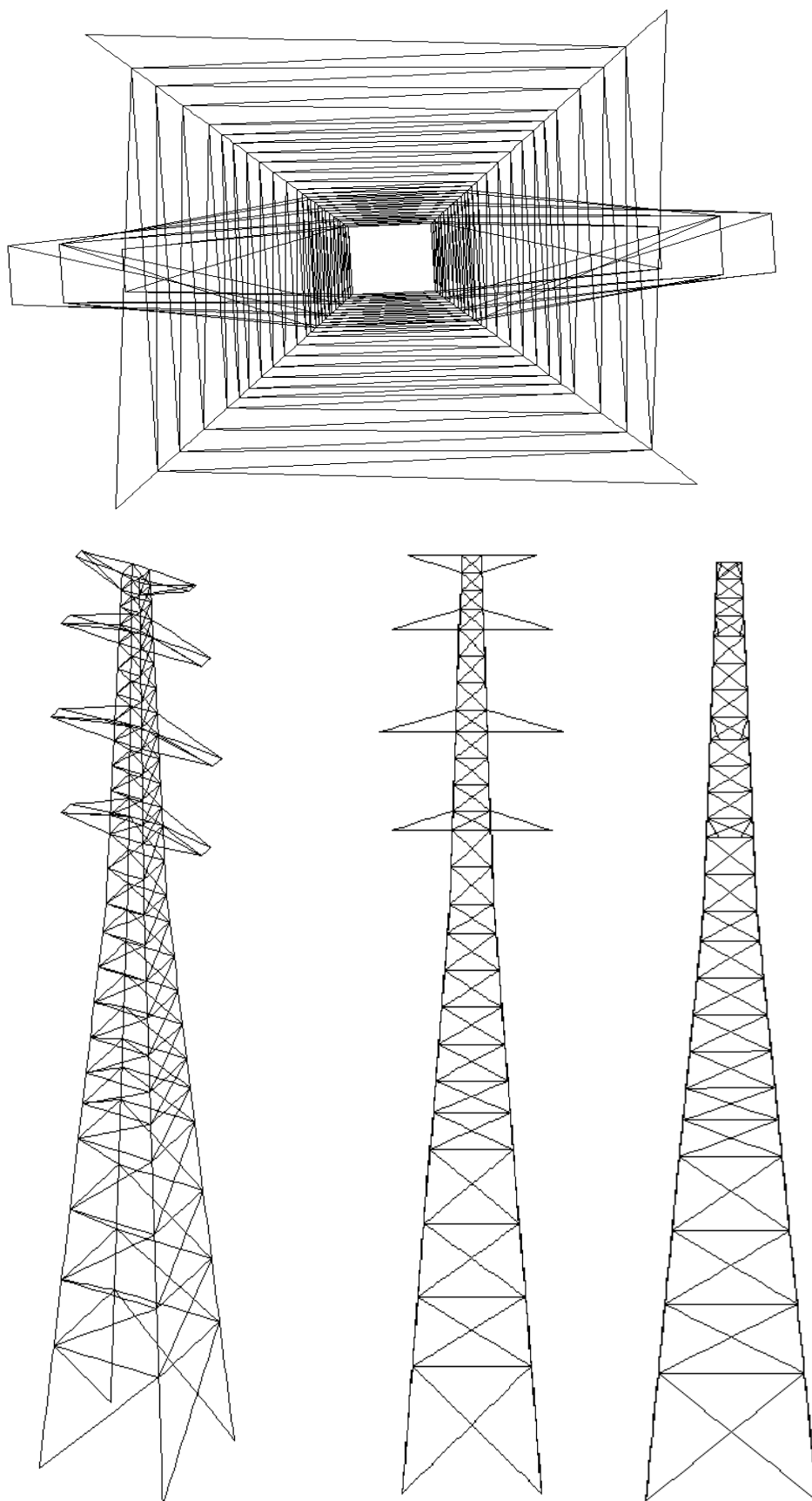


图 3.3 ANSYS 中建立的输电塔结构有限元模型

3.4 输电塔结构的风荷载模拟

由第二章关于风荷载特性的理论分析知道，某一高度的风速时程包括两部分组成——脉动风速和平均风速。根据公式（2-11）可以把风速转换为风压，然后根据风压和结构的作用面积就能方便地把风压转化为风荷载了。因此，关于输电塔的风荷载时程模拟其实就是关于风速时程的模拟，其中产生静力作用的平均风部分可以根据平均风的指数风剖面求出不同高度处的平均风速，所以这里的模拟主要是指脉动风速的数值模拟。本文采用计算速度快且被广泛使用的 AR 法来模拟脉动风速时程。

3.4.1 脉动风速的数值模拟

采用 AR 法模拟脉动风速时程的过程可以使用 MATLAB 软件编写程序，使用程序计算完成，编写程序的流程图如图 3.4 所示：

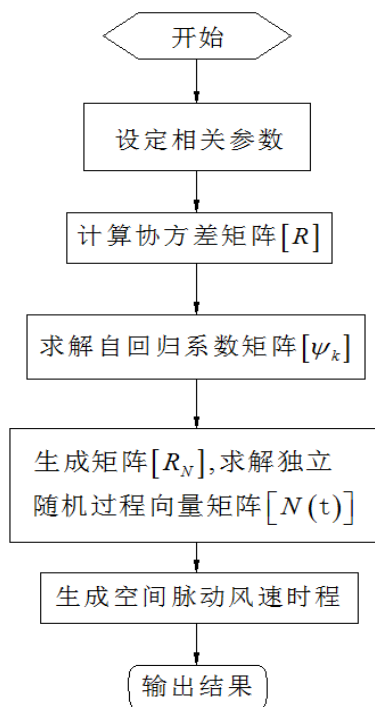


图 3.4 利用 MATLAB 软件模拟风速流程图

在模拟之前，先做出以下假定^[37]：

- （1）任意一点平均风速不会随着时间变化；
- （2）脉动风速时程应该考虑空间相关性；
- （3）脉动风速时程为零均值 Gauss 平稳随机过程。

由于输电塔结构构造复杂包含的节点数目较多，要把每个点的脉动风速都模拟出来需要耗费很多资源而且是没有必要的，所以可以选取一部分节点作为代表进行计算。为了使模拟的节点具有代表性，本文考虑把输电塔结构按高度和结构特点划分为 8 段，取每一段输电塔的中心点作为风速时程的模拟点。所选取的每段塔架结构的中心点的高度如表 3.2 所示。实际中风荷载对输电塔产生风振作用的风向角不同会对结构产生不同的影响^[38]。对于单塔结构 Y 向的风振作用对结构产生的影响时最大的，所以在本文中选取 Y 方向的风振作用来计算风荷载。

表 3.2 输电塔架模拟分段及各段中心点高度

模拟点	高度
1	5.2
2	11.4
3	16.4
4	21.3
5	25.5
6	30.3
7	34.5
8	37.8

在使用 MATLAB 软件编程模拟风速时程时，关于脉动风速、指数风剖面以及模拟时长等参数的取值，按表 3.3 中的数值取用。

表 3.3 时程法模拟风速时程参数表

参数	取值
标准高度	10m
基本风速	30 m/s
地貌类别	B 类
地面粗糙度指数	$\alpha = 0.16$
脉动风速功率谱	Davenport 谱
自回归阶数	4 阶
总时间	200s
频率范围	0.001-10Hz

经过 MATLAB 软件计算，可以得到各段中心点处的脉动风速时程曲线，如图

所示。

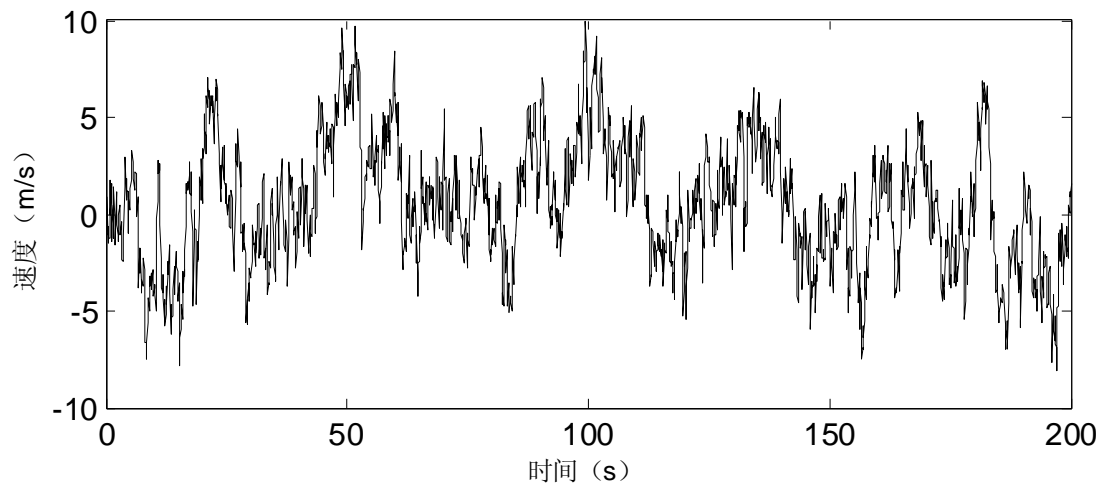


图 3.5 1 号模拟点脉动风速

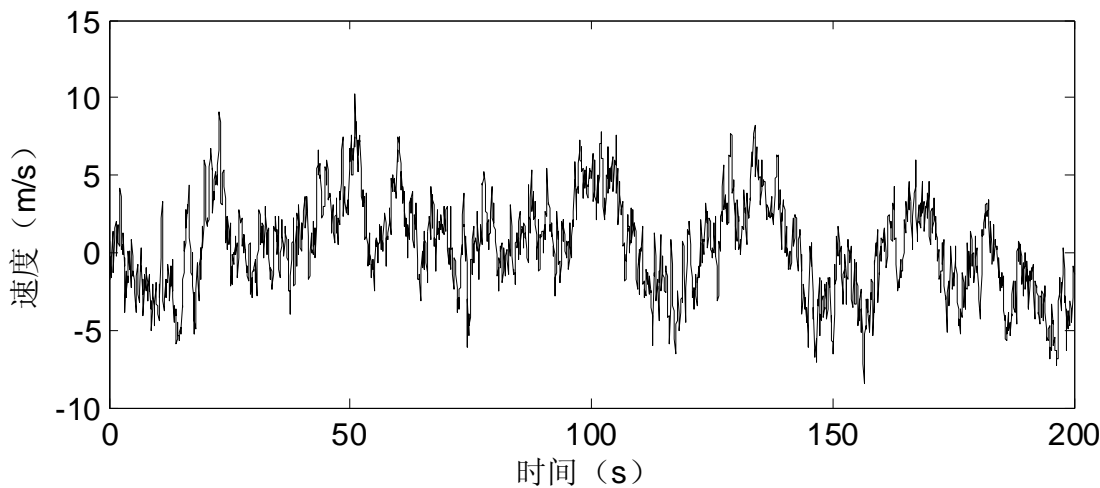


图 3.6 2 号模拟点脉动风速

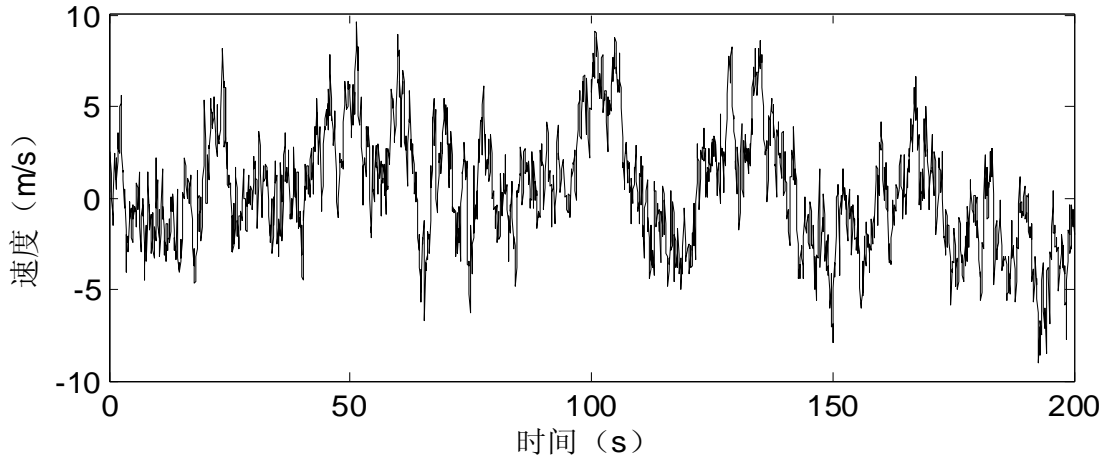


图 3.7 3 号模拟点脉动风速

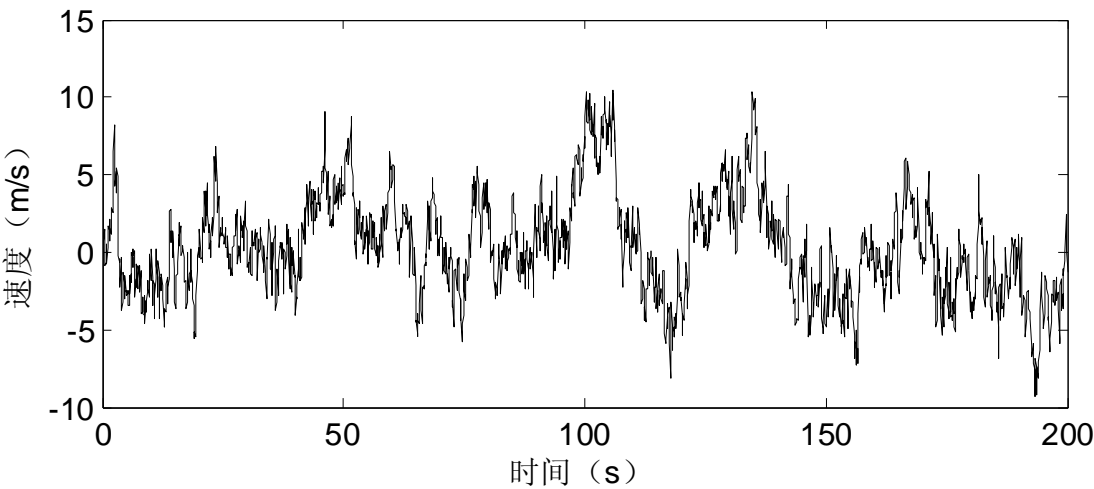


图 3.8 4 号模拟点脉动风速

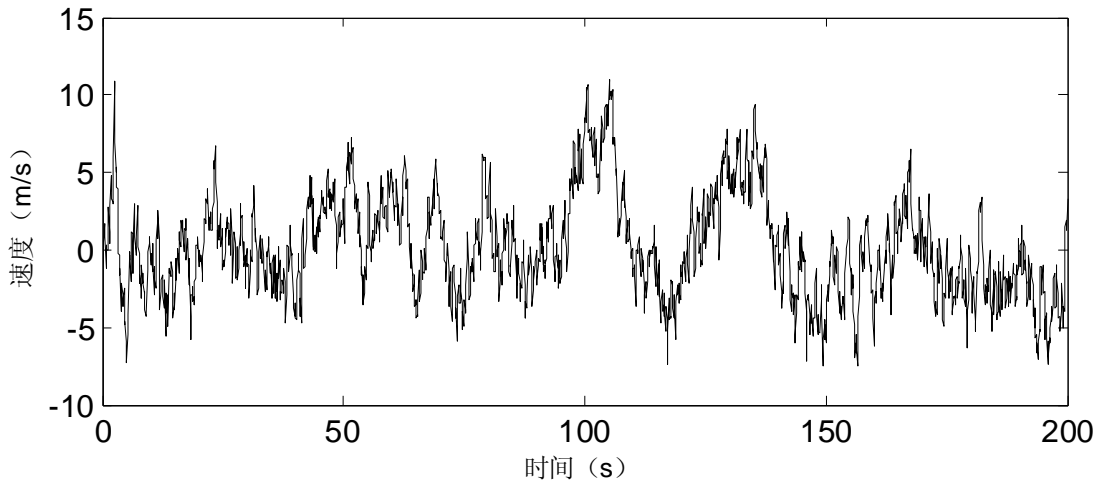


图 3.9 5 号模拟点脉动风速

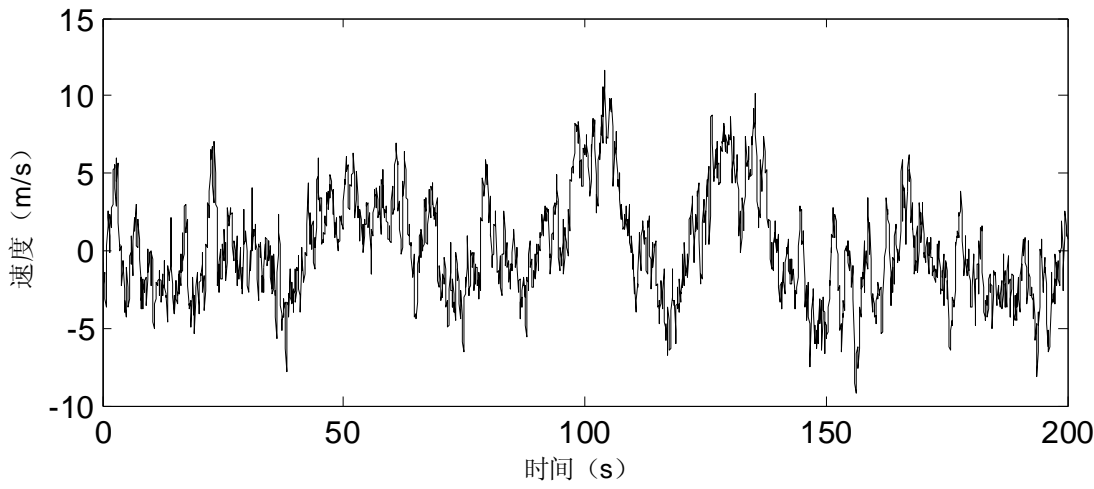


图 3.10 6 号模拟点脉动风速

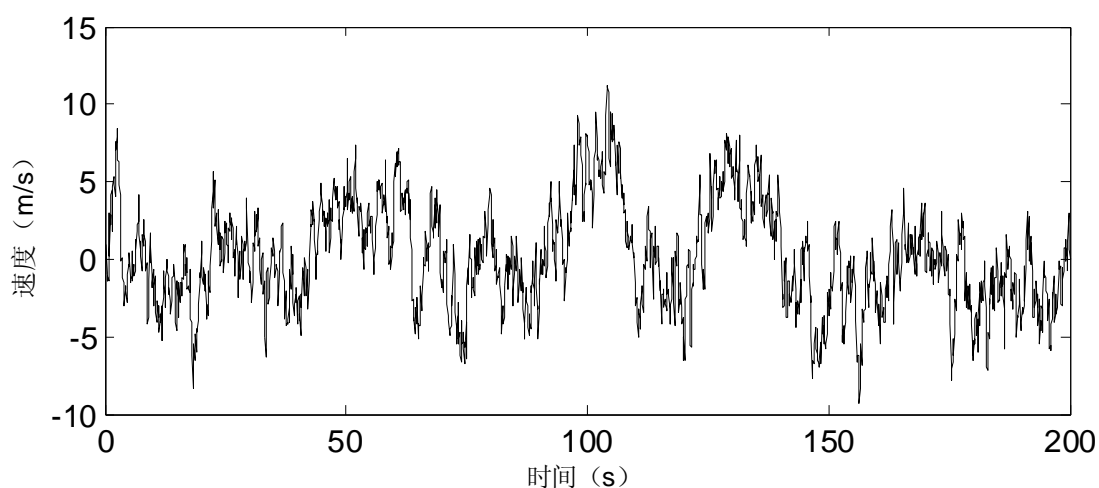


图 3.11 7号模拟点脉动风速

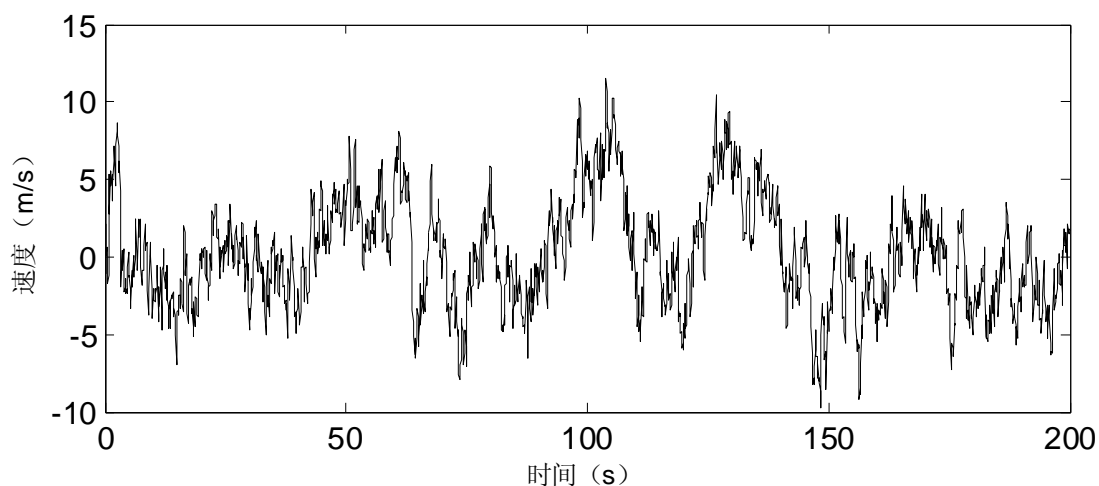


图 3.12 8号模拟点脉动风速

由于模拟生成的脉动风速时程与目标风速谱函数的吻合程度对后面的分析结果的影响很大，因此在使用前有必要对模拟结果进行检验。由于人工模拟是一个随机过程，一般可以采用概率论以及随机振动理论对其进行研究分析。只要知道几个数学统计参数，如均值、根方差等便可以描述整个随机过程，同时这些数学统计参数可以由相关的函数或者功率谱密度来表示。所以，可以通过对模拟风速场的功率谱特征与目标谱进行比较来检验所模拟的脉动风是否正确，鉴于篇幅关系，在此仅列出塔中和塔顶的模拟点的风速功率谱对比图，如图 3.13，图 3.14 所示。

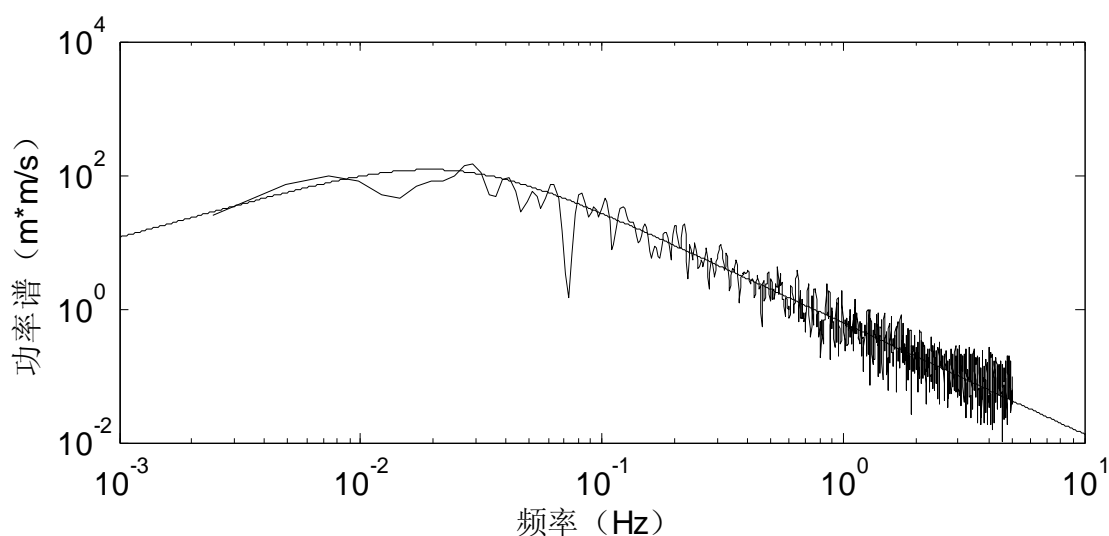


图 3.13 塔中模拟点与目标风谱比较

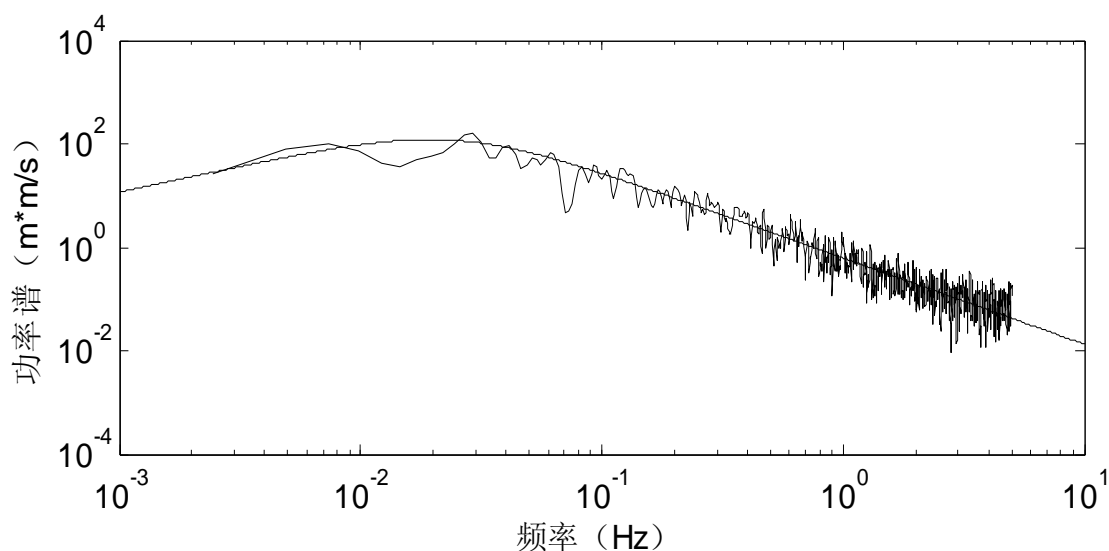


图 3.14 塔顶模拟点与目标风谱比较

由图 3.13 和图 3.14 模拟节点的功率谱和 Davenport 功率谱的图形对比可以看出, 模拟的风速谱谱线趋势和目标谱是比较吻合的。这说明本文编写的模拟输电塔结构的脉动风速时程的 MATLAB 程序是合理有效的, 而且其中所选取的参数也是合理的, 也就是说在这里模拟的脉动风速是符合真实规律的。

输电塔结构的实际风速不是只有脉动风速, 还需要叠加上平均风速这部分。平均风速的大小可由公式 (2-38) 计算求出, 叠加后输电塔结构的风速时程曲线如下所示。

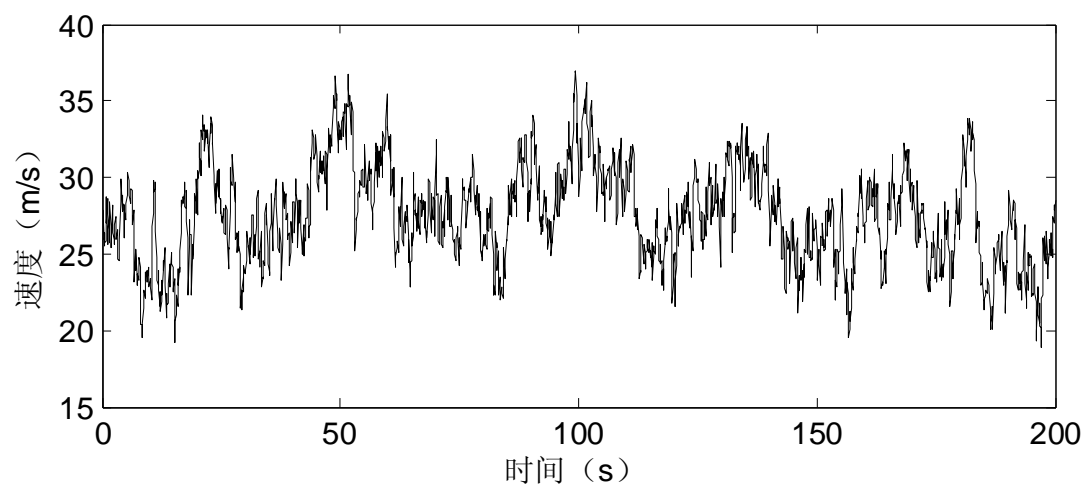


图 3.15 1 号模拟点风速时程

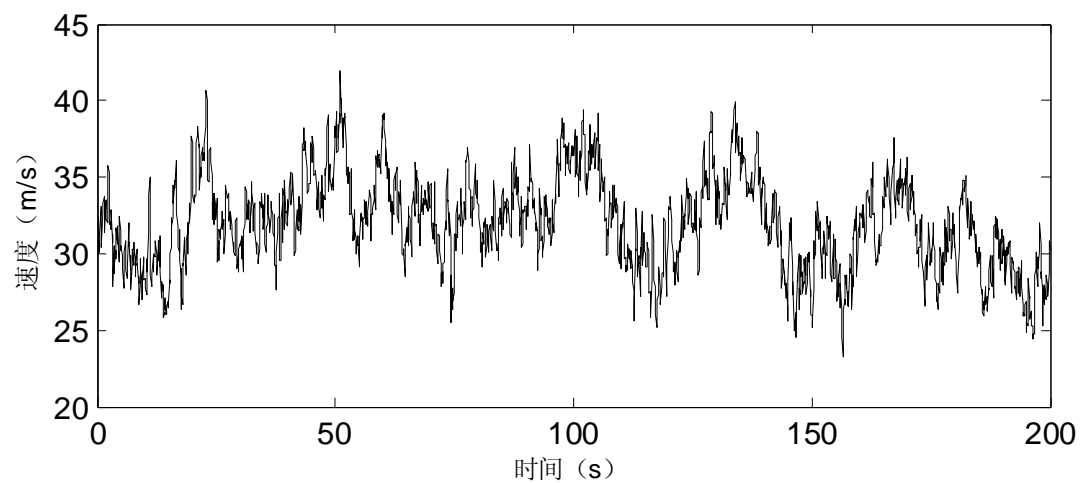


图 3.16 2 号模拟点风速时程

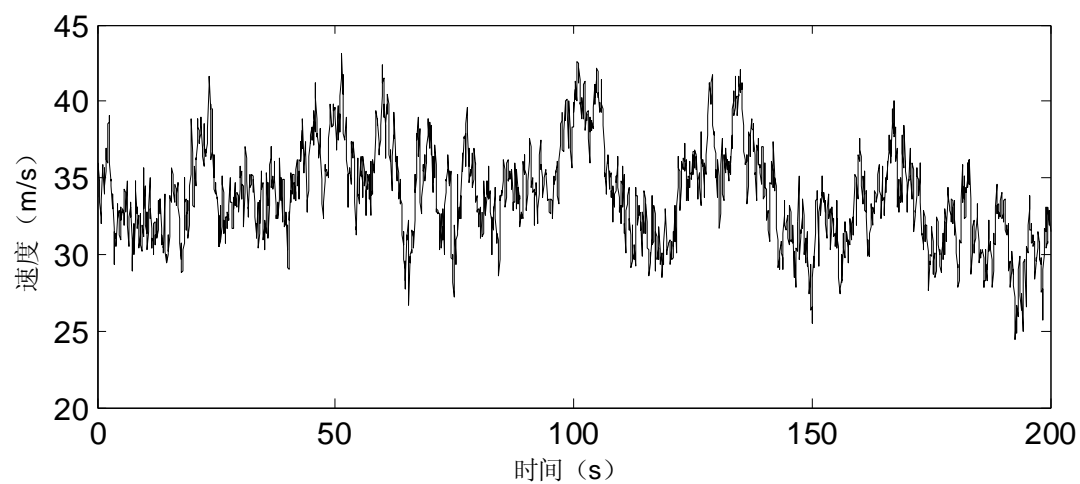


图 3.17 3 号模拟点风速时程

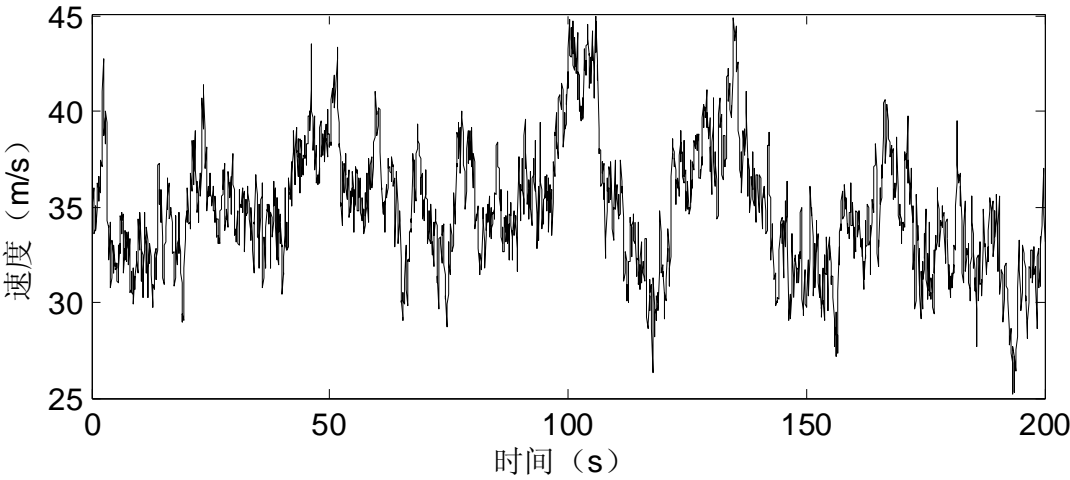


图 3.18 4 号模拟点风速时程

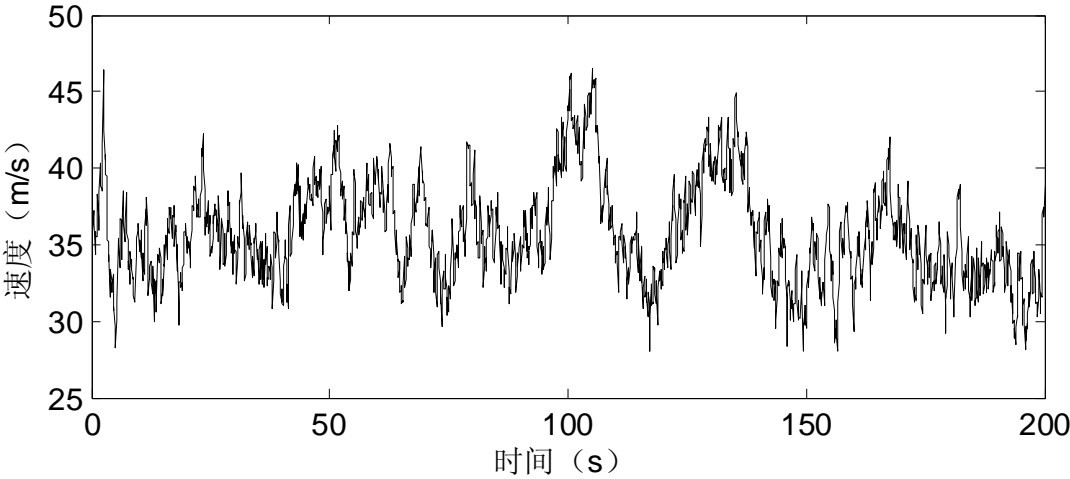


图 3.19 5 号模拟点风速时程

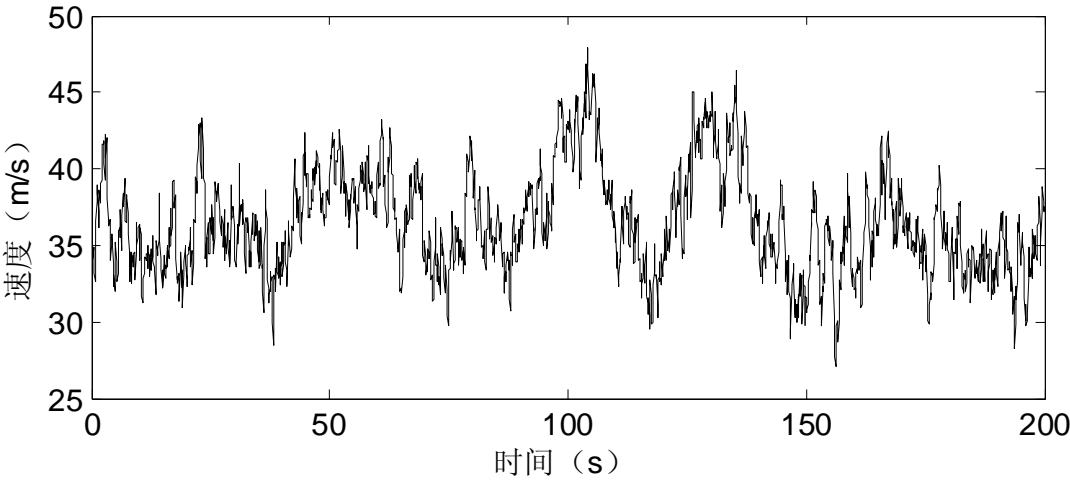


图 3.20 6 号模拟点风速时程

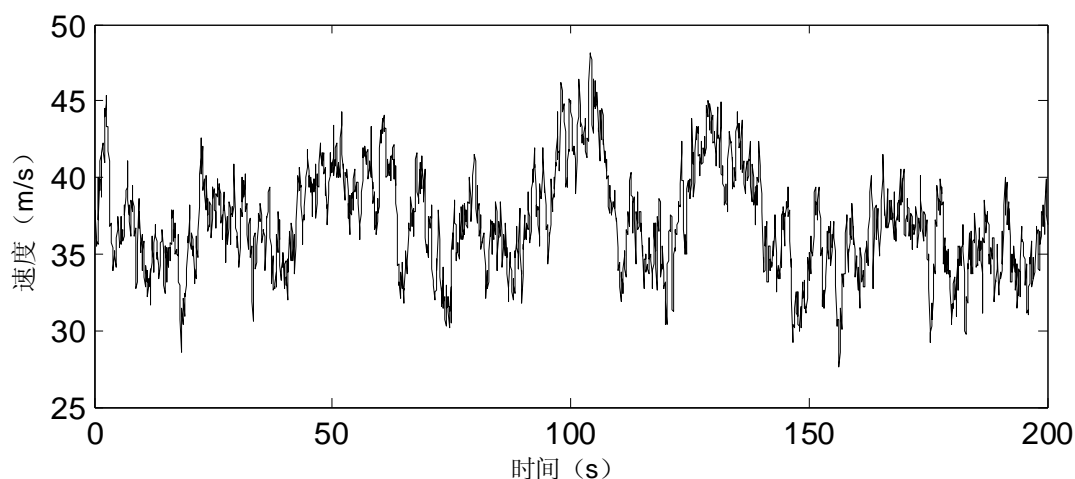


图 3.21 7号模拟点风速时程

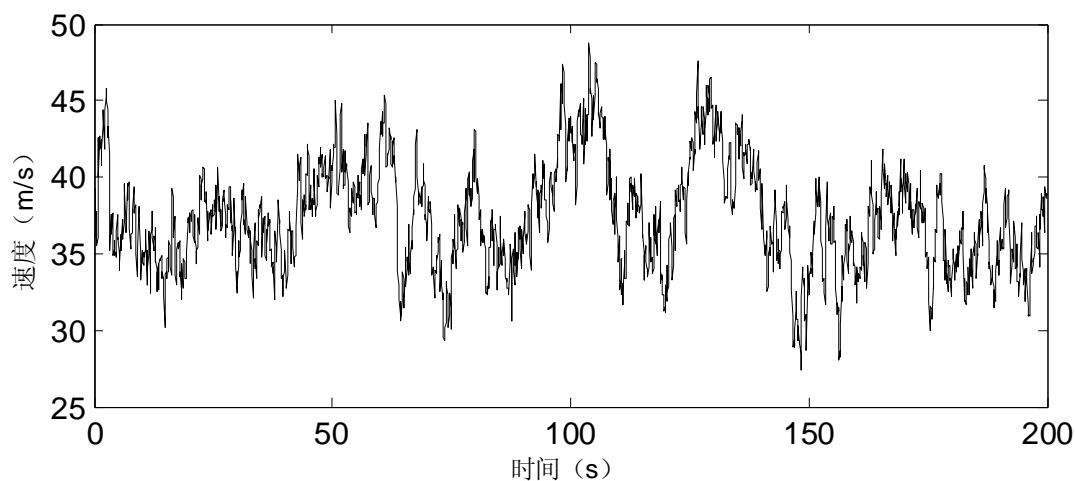


图 3.22 8号模拟点风速时程

3.4.2 输电塔风荷载的模拟

输电塔塔身所受到的风荷载的计算公式为：

$$F = \mu_s A_s V(t)^2 / 1.63 \quad (3-1)$$

式(3-1)中 μ_s 为结构构件的体形系数，参考《建筑结构荷载规范(GB 50009-2012)》，体形系数取 2.5， A_s 为输电塔构件的迎风面积。要将荷载等效作用在节点上，可以利用以下方法：每段所有节点的迎风面积总数除以该段内的节点数^[39]，节点的迎风面积为与此节点相连的每个单元在顺风受力面上的投影面积的一半。 $V(t)$ 为各段中心点处的风速时程，根据式(3-1)便可以得到输电塔结构各

个模拟点所受的随时间变化的风荷载时程，如下图所示，列出了 8 个中心点的风荷载时程。

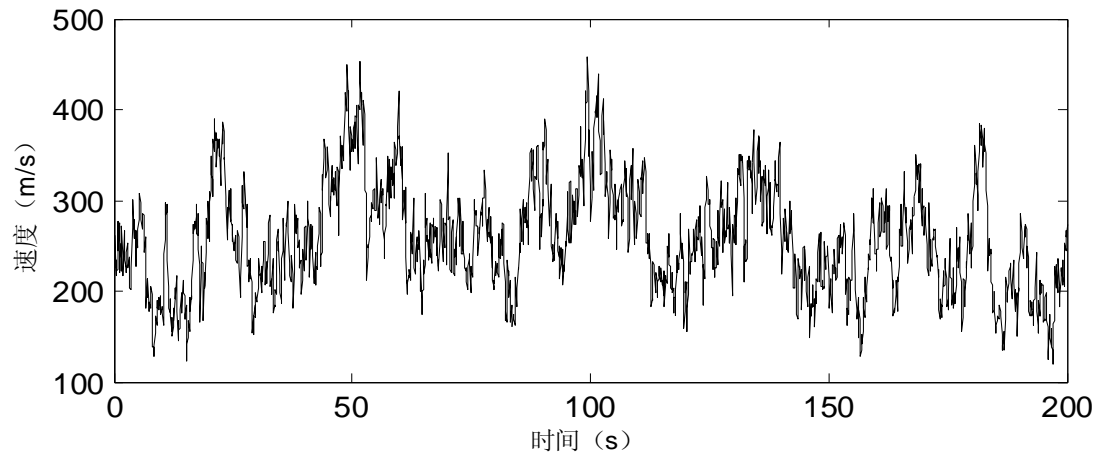


图 3.23 1 号模拟点风荷载时程

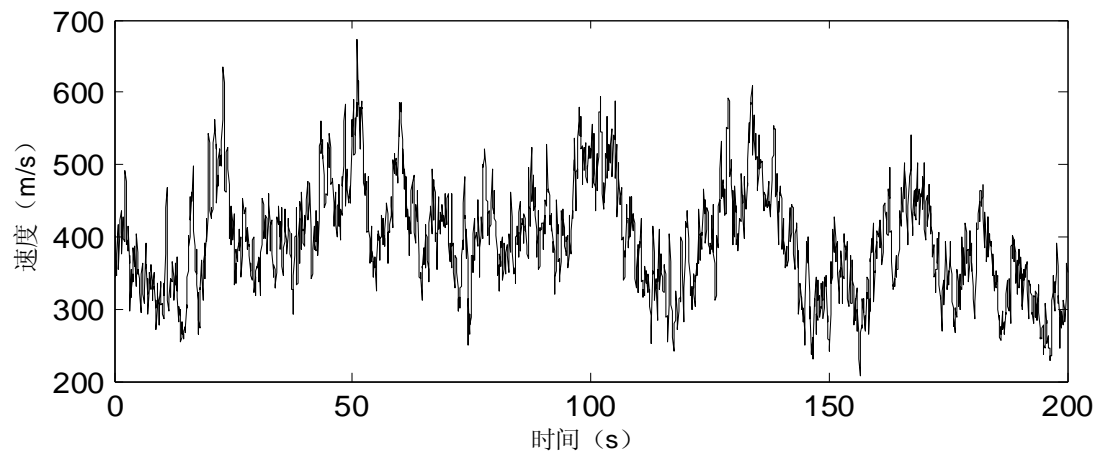


图 3.24 2 号模拟点风荷载时程

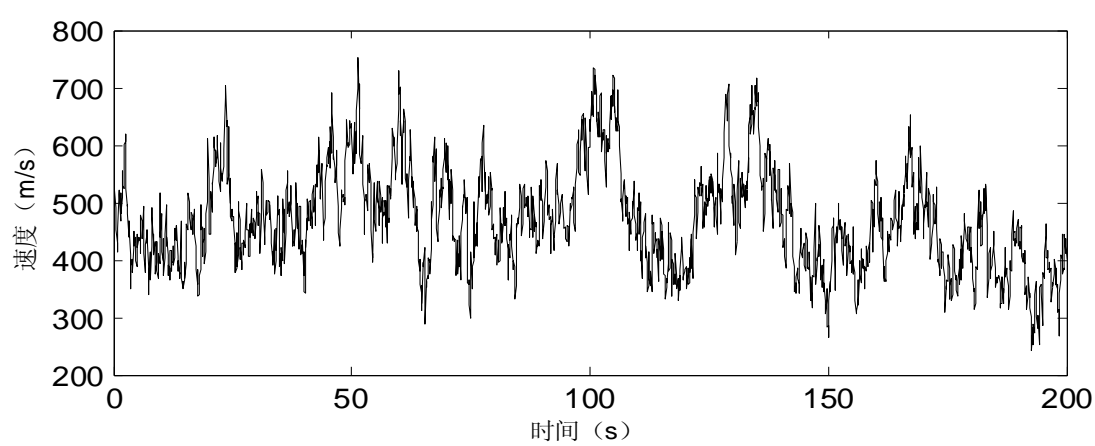


图 3.25 3 号模拟点风荷载时程

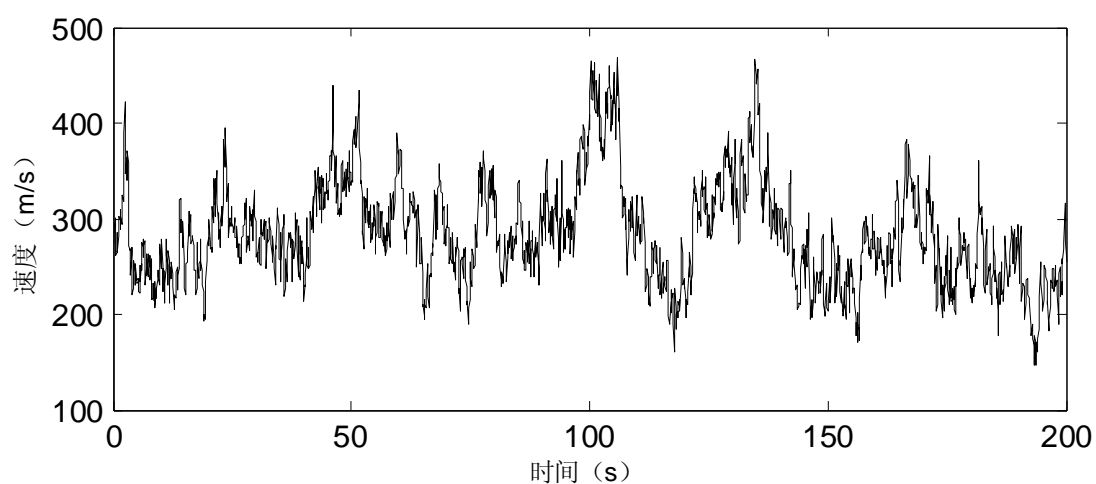


图 3.26 4 号模拟点风荷载时程

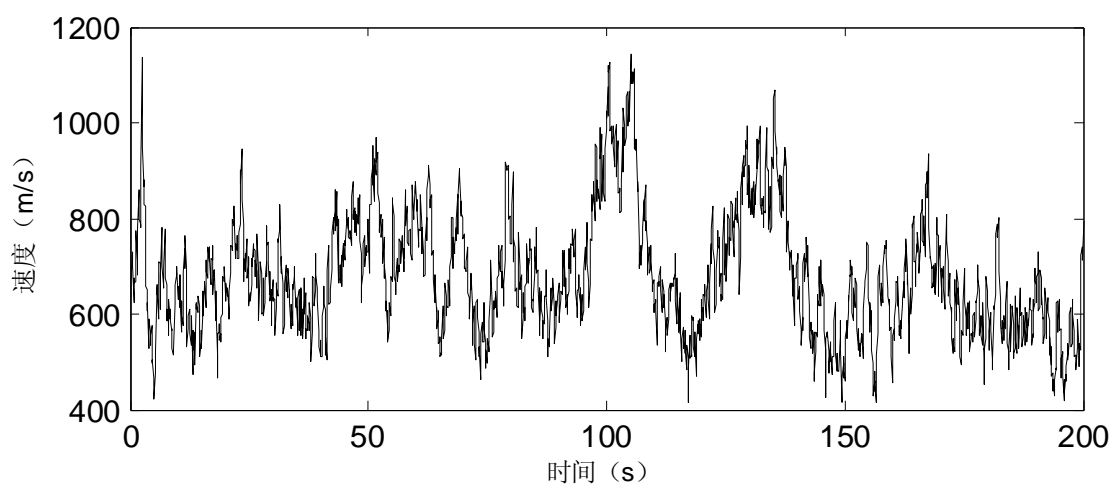


图 3.27 5 号模拟点风荷载时程

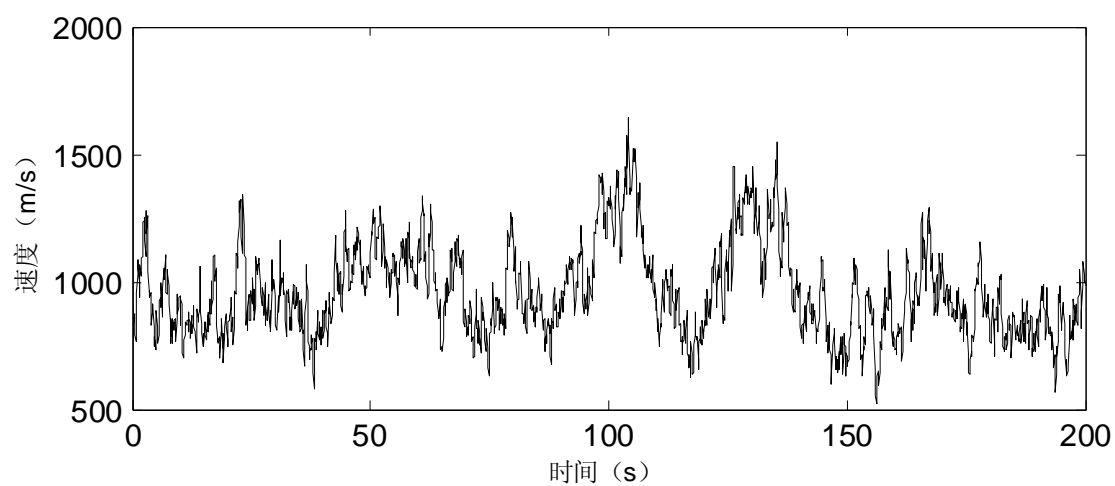


图 3.28 6 号模拟点风荷载时程

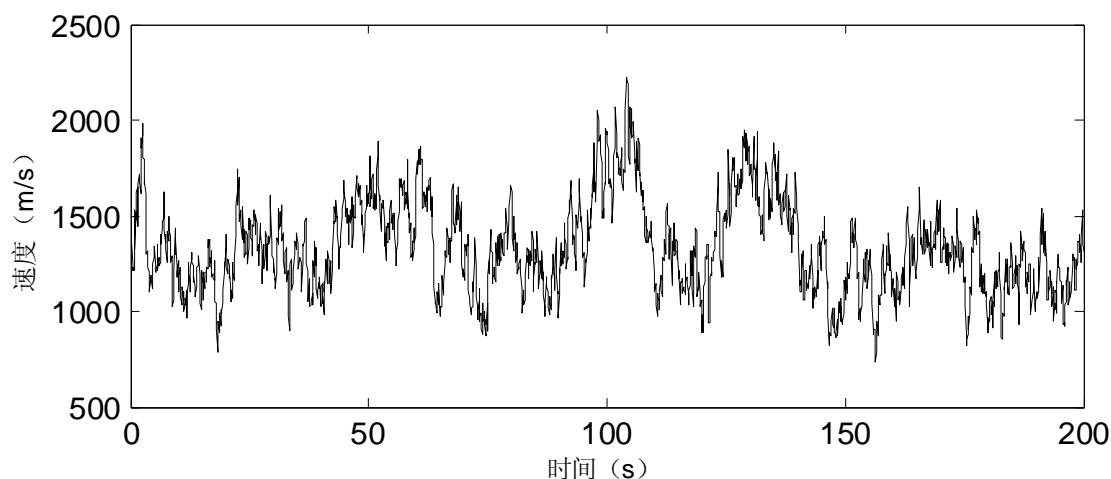


图 3.29 7号模拟点风荷载时程

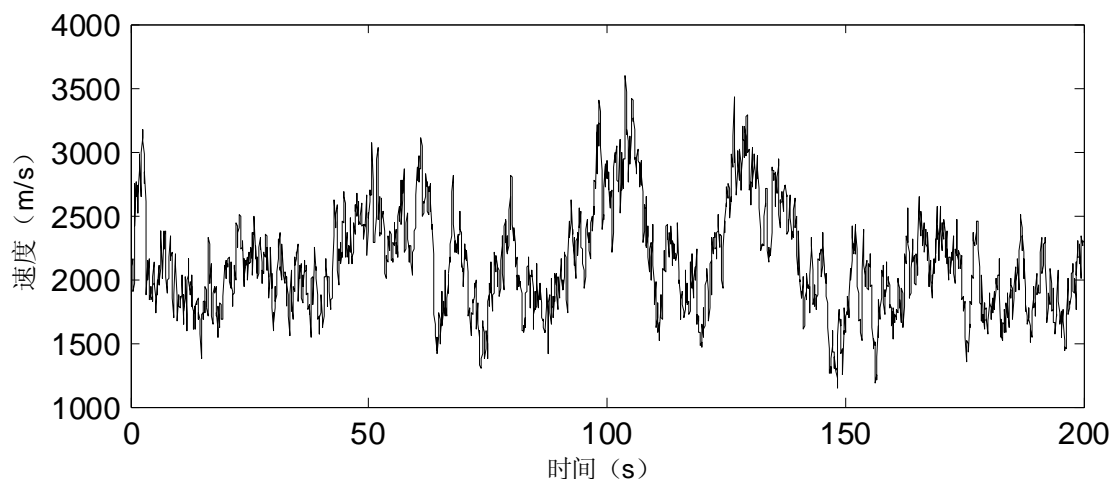


图 3.30 8号模拟点风荷载时程

3.5 本章小结

本章讲解了有限单元法的相关思想和理论，介绍了使用有限元建模的步骤及各个地方需要注意的要点，以确保建立的模型的准确无误。运用大型有限元商业软件 ANSYS 和 BEAM4 空间梁单元建立了输电塔架的三维有限元模型，并确定了输电塔结构模拟风荷载的模拟点。然后基于第二章关于风荷载模拟的理论分析，采用数学计算软件 MATLAB 编写程序，应用 AR 法模拟了 8 个模拟点的脉动风速时程，通过和目标风速谱的对比验证了模拟的脉动风的正确性。通过对模拟点迎风面积的转换并利用风荷载计算公式，得到了模拟点的风荷载时程曲线。

本章应用前面章节的理论和有限单元法的建模要求，建立了输电塔和风荷载

的数值模拟，为后面的振动控制提供了外部激励。

4 基于 ANSYS 软件的输电塔主动控制模拟

4.1 前言

1972 年，Yao 发表了题目为《Concept of structure control》^[40]的论文，从此便开启了一门新的学科—结构振动控制。经过 40 多年的发展，结构振动控制已经取得了丰硕的成果，现在已经成为建筑，桥梁等土木工程结构的抗震，抗风的重要手段之一。结构振动控制是土木工程专业和电气工程及其自动化专业交叉产生的一门学科，这门新兴的学科使振动控制理论在土木结构上发挥了重要作用，使土木结构的振动破坏问题有了新的解决办法。按照是否需要外部能源来驱动出力装置，土木工程结构振动控制具体可以划分为三种方法：被动控制，主动控制和混合控制，它们的具体应用和要求如图 4.1 所示。由于本章采用主动控制方法对输电塔结构进行控制。

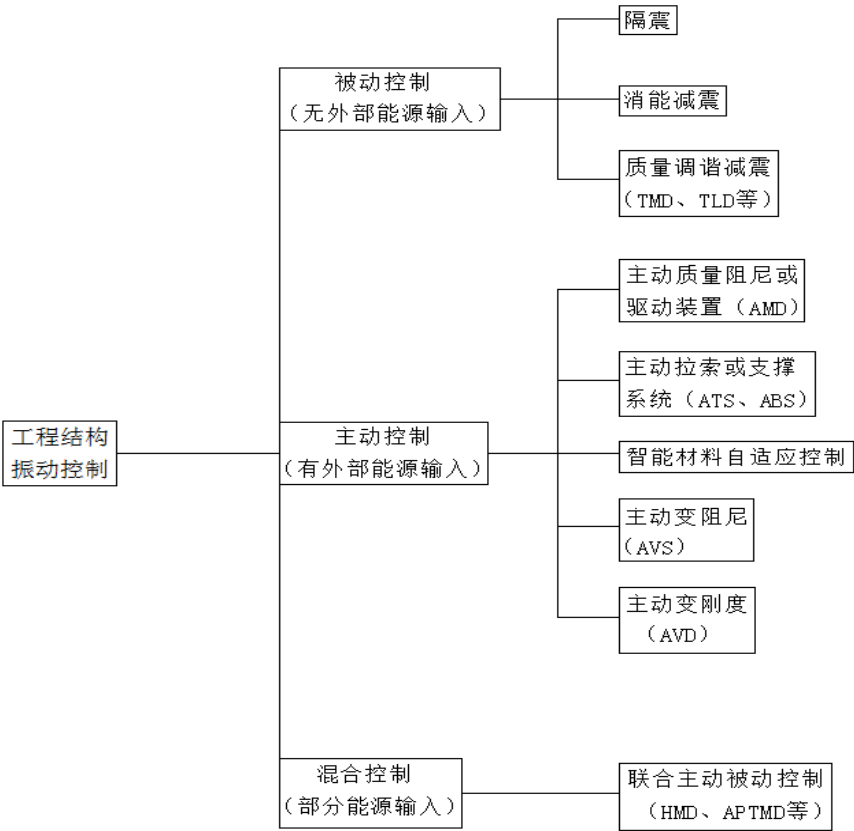


图 4.1 振动控制方法分类

简单地说，结构振动主动控制就是指在结构受到外界干扰发生振动的过程中，能根据结构上安装的传感器收集的结构状态反馈信息，并采用某种控制算法迅速

的计算出所应施加给结构的控制力，利用布置在结构上的作动器装置出力，以迅速的控制和减弱外界干扰对结构的产生的影响。

其主要核心部分就是制定出一个满足指定控制目标性能函数的控制算法，这个控制算法应该能够及时，准确的计算出作动器出力大小，对结构发生的瞬时的振动及时作出反馈和控制。

目前，关于主动控制算法的研究，多数都会使用数值仿真的方法进行模拟研究，模拟仿真中一般是采用 MATLAB 编程实现结构主动控制，可是目前几乎没有一款通用软件可以实现结构主动控制^[41]。结构主动控制中尤其是高耸结构的主动控制，采用通用软件计算分析相较于自己编程实现主动控制的结果更为可靠。本章采用线性二次型经典主动控制算法和大型通用有限元软件 ANSYS 联合计算分析，对输电塔结构的风振响应主动控制数值模拟，实现了基于通用软件分析的输电塔结构的主动控制^[42]。

4.2 现代控制理论

结构振动控制理论是基于现代控制理论逐渐发展起来的。现代控制理论是在计算机技术的发展大背景下，在空间技术大力发展，迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的的最优控制问题下，如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中高精度、低能耗控制等实际问题迫切要求下迅速发展起来的。现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段，适用于多变量、非线性、时变系统。虽然在本质上是一种“时域法”，但并不是对经典频域法的从频域到时域的简单回归。而是立足于新的分析方法，有着新的目标的新理论。现代控制理论研究内容非常广泛，主要包括三个基本内容：多变量线性系统理论，最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。现在控制理论从理论上解决了系统的能控性、能观性、稳定性及复杂系统的控制问题^[43]。

现代控制理论有如下优点：

(1) 现代控制理论不仅适用于 SISO 线性定常系统，而且易于推广到 MIMO 系统，时变系统和非线性系统等，显示了更强的描述系统的动态行为特性的能力，能够处理的系统的范围更大。

(2) 现代控制理论利用时域分析法容易给人以时间上清晰地性能指标，如最快速度，最小能量等，易于理解、接受和优化设计^[44]。

(3) 现代控制理论易于考虑系统的初始条件，使得所涉及的控制系统有更高

的精度和更佳的性能指标。

(4) 现代控制理论易于用计算机进行系统分析、计算和实现计算机控制, 所设计的控制系统的实现具有极大的可行性、优越性和先进性。

4.2.1 状态空间模型的基本概念

系统的状态空间模型是建立在状态, 状态空间等概念的基础之上的。为此, 首先对系统, 状态, 状态空间等基本概念进行定义^[45]。

动态系统, 所谓系统, 是相互制约的各个部分的有机组合, 且具有一定的结构和功能的整体。其某时刻的输入不仅与该时刻的输入有关, 还与该时刻以前的积累输入有关。在状态空间内建立的动态系统的输入输出数学关系, 可以是离散时间的差分方程, 也可以是连续时间的状态方程。

状态, 状态是指系统的运动状态, 即描述系统运动状态信息的集合称为状态。

状态变量, 系统的状态变量是指能够完全确定系统运动状况的信息, 即系统变量是一组最小数目的统计值, 它包含了不多不少的信息, 可以在不考虑系统过去的输入及相应条件下, 能够完全确定系统在现在和将来的反应。

状态空间, 以状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 为坐标轴构成的一个 n 维欧氏空间。

状态空间的表达式, 状态空间的表达式有两个, 即状态方程和输出方程。状态方程即是由系统的状态变量构成的一阶微分方程组。输出方程即联系系统输出变量与状态变量的方程。

4.2.2 结构振动控制系统的状态方程

通过对以上基本概念的了解, 根据结构动力学中的结构运动方程, 可以建立土木工程结构在随机干扰影响下的控制系统的状态方程。在结构振动控制系统中, 一般选取结构的自由度位移和速度为其状态变量, 然后用状态变量及其一阶微分组成方程组, 共同来描述结构自由度响应的位移、速度和加速度, 这个一阶微分方程组就是结构振动控制系统的状态方程。具体表达如下:

根据结构动力学, 对于施加控制力的结构的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{Z}(t)\} + [C]\{\dot{Z}(t)\} + [K]\{Z(t)\} = [S]\{U(t)\} + [D_s]\{F(t)\} \quad (4-1)$$

式中, $\{Z(t)\}$ — n 维结构自由度位移向量;

$\{\dot{Z}(t)\}$ — n 维结构自由度速度向量;

$\{\ddot{Z}(t)\}$ — n 维结构自由度加速度向量;

$[U(t)]$ — r 维系统控制力输入, r 为控制器的个数;

$[F(t)]$ — n 维系统随机干扰输入;

$[M]$ — $n \times n$ 结构的质量矩阵;

$[C]$ — $n \times n$ 结构的阻尼矩阵;

$[K]$ — $n \times n$ 结构的刚度矩阵;

$[D_s]$ — $n \times n$ 随机干扰位置矩阵;

$[S]$ — $n \times r$ 控制器在结构中的分布矩阵。

定义结构振动控制系统的状态向量为:

$$\{X(t)\} = \begin{Bmatrix} \{Z(t)\} \\ \{\dot{Z}(t)\} \end{Bmatrix}$$

将其代入式 (4-1) 中并化简, 得到:

$$\{\dot{X}(t)\} = [A]\{X(t)\} + [B]\{U(t)\} + [D]\{F(t)\} \quad (4-2)$$

$$\text{式中: } [A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix},$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[M]^{-1}[S] \end{bmatrix}, \quad [D] = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1}[D_s] \end{bmatrix}。$$

式 (4-2) 即为结构控制系统的状态空间方程。

4.3 主动控制系统及 MATLAB 控制过程实现

4.3.1 主动控制系统组成及减振机理

结构振动的主动控制是利用外部能源^[46], 在结构物受到外部激励而发生振动的过程中, 瞬时施加控制力或瞬时改变结构的动力特性, 以迅速衰减和控制结构振动的一种减振技术。也就是说, 结构主动控制系统主要有信息采集系统 (传感

器)、计算机控制系统(控制器)和主动驱动系统(作动器)等三部分组成,如图4.2所示。

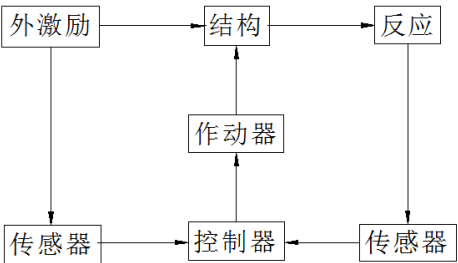
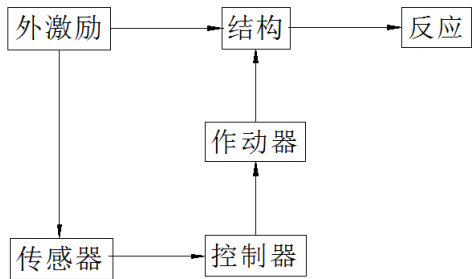
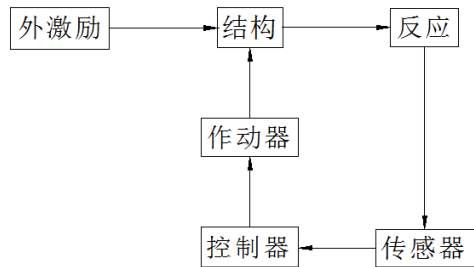


图 4.2 结构振动系统的组成

主动控制系统按照控制器的工作方式可以分为开环控制、闭环控制和开闭环控制三种^[47]。开环控制即控制器通过传感器测得输入结构的外部激励,据此来调整作动器施加给结构的控制力,而不反映系统输出的结构反应的信息。如图4.3(a)所示。闭环控制^[48]即控制器通过传感器测得结构反应,据此来调整作动器施加在结构上的控制力,而不反应输入结构的外部激励信息,如图4.3(b)所示。开闭环控制即控制系统通过传感器同时测得输入结构的外部激励和系统输出的结构反应,据此来调整作动器施加给结构的控制力,如图4.2所示。



(a)



(b)

图 4.3 开环控制系统与闭环控制系统

(a) 开环控制系统; (b) 闭环控制系统

其中实现主动控制力的措施有很多种方式^[49-52]，如主动质量阻尼器 AMD (Active Mass Damper)、主动质量驱动器 AMD (Active Mass Driver)、主动拉索系统 ATS (Active Tendon System)、主动挡风板 ADA (Active Dynamic Apendage) 和脉冲发生器等 PG (Pulse Generator) 等。

这里为了综合全面说明主动控制算法的减振机理，选取开闭环系统为例进行讲解。对于开闭环系统，主动控制力向量 $[U(t)]$ 应由结构反应(包括 $\{Z(t)\}$ 、 $\{\dot{Z}(t)\}$ 和 $\{\ddot{Z}(t)\}$)和外界随机干扰(用 $\ddot{x}_g(t)$ 表示)所决定，即

$$\{U(t)\} = [K_b]\{Z(t)\} + [C_b]\{\dot{Z}(t)\} + \{F_b\}\ddot{x}_g(t) \quad (4-3)$$

式中， $\{K_b\}$ 和 $\{C_b\}$ 分别为结构位移和速度反应的增益矩阵；

$\{F_b\}$ 为外界干扰的增益向量。

式(4-3)中， $\{K_b\}$ 和 $\{C_b\}$ 可以是反馈增益矩阵，也可以是前馈增益矩阵。由于主动控制力向量 $[U(t)]$ 中仅包含有结构的位移和速度反应(即 $\{Z(t)\}$ 和 $\{\dot{Z}(t)\}$)的增益，因此，如果 $\{K_b\}$ 和 $\{C_b\}$ 是反馈增益矩阵的话，那么式(4-3)所表达的其实是部分反馈增益的主动控制力。有研究表明，如果对于结构的加速度的反应要求不严格，使用(4-3)部分反馈增益所实现的主动控制力完全可以实现较为理想的效果，但如果对于含有精密仪器或者比较重要的结构等对加速的控制要求十分严格的结构施加控制时，应该使用全反馈的主动控制力，此时，主动控制力向量 $[U(t)]$ 应同时包含为结构位移、速度和加速度反应(即 $\{Z(t)\}$ 、 $\{\dot{Z}(t)\}$ 和 $\{\ddot{Z}(t)\}$)的增益，即：

$$\{U(t)\} = [K_b]\{Z(t)\} + [C_b]\{\dot{Z}(t)\} + [M_b]\{\ddot{Z}(t)\} + \{F_b\}\ddot{x}_g(t) \quad (4-4)$$

式中， $[M_b]$ 为结构加速度反应的增益矩阵。

把式(4-3)代入到(4-1)中，通过化简，可以得到在随机干扰输入下主动控制系统结构的运动方程为：

$$\begin{aligned} & [M]\{\ddot{Z}(t)\} + ([C] - [S][C_b])\{\dot{Z}(t)\} + ([K] - [B][K_b])\{Z(t)\} \\ & = \{F(t)\} + [B][F_b]\ddot{x}_g(t) \end{aligned} \quad (4-5)$$

从(4-5)与式(4-1)对比可以看出，对于采用主动控制的结构体系，由于主

动控制力的施加，结构体系的阻尼和刚度矩阵以及外激励向量都发生了改变，且可以看出，闭环控制的作用就是改变结构参数（刚度和阻尼），开环控制的作用就是改变干扰力^[53]。

对于建立主动控制系统的结构，其部分或全部状态、外界干扰和控制力大部分或者全部需要直接的实时观测，才能根据主动控制算法计算出所应该施加的控制力，其中这些量的输出可统一地表示为以下输出方程：

$$\{Y(t)\} = [C_0]\{X(t)\} + [D_0]\{F(t)\} + [B_0]\{U(t)\}$$

式中： $\{Y(t)\}$ —系统输出状态向量；

$[C_0]$ —系统输出控制矩阵。

4.3.2 最优控制

对于振动控制系统来说，控制的任务就是：当结构由于某种作用偏离初始状态时，控制系统施加控制力 $\{U(t)\}$ 使结构恢复到初始状态。对于这个过程，可以理解为状态空间的一个点的运动或是系统状态的运动。实现这个过程可以有很多方式，那么就需要从所有能实现的控制中找出一种效果最好而且使耗能和其他性能均达到极大或极小值的方式，这种问题就叫做最优控制问题，通常把衡量控制效果的好坏或者评价控制品质优劣的指标，称为性能指标函数，下面结合公式具体展开来说。

一般情况下，结构的状态方程表示为以下形式：

$$\{X\} = f(\{X(t)\}, \{U(t)\}, \{P(t)\}, t) \quad (4-6)$$

在实际的控制问题中，控制力向量 $\{U(t)\}$ 是不能随意取值的，必须有一定的限制，即要求其应该满足一定的约束条件：

$$\phi_j(\{X(t)\}, \{U(t)\}) \leq 0 \quad (4-7)$$

这时所有满足（4-7）要求的控制力的集合记为：

$$\{\bar{U}\} = \{\{U(t)\} | \phi_j(\{X(t)\}, \{U(t)\}) \leq 0\} \quad (4-8)$$

式中： $\{\bar{U}\}$ 称为控制域；

$\{U(t)\} \in \{\bar{U}\}$ ，称为容许控制域。

通常最优控制系统的初始时刻 t_0 及初始状态 $\{X(t_0)\}$ 是给定的，这时的最优控制问题称为固定始端的控制问题；但是如果 t_0 固定，而 $\{X(t_0)\}$ 是任意的，则称为自由始端控制问题。若 $\{X(t_0)\}$ 必须满足某一约束条件：

$$\psi_j(\{X(t_0)\}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m (m \leq n) \quad (4-9)$$

那么，相应的始端集合则记为：

$$\{\Psi_0\} = \{\{X(t_0)\} | \psi_j(\{X(t_0)\}) = 0\} \quad (4-10)$$

若 $\{X(t_0)\} \in \{\Psi_0\}$ ，则最优控制问题变为可变始端控制问题。

类似初始条件，固定终端问题是指终端时刻 t_f 和终端状态 $\{X(t_f)\}$ 均固定的最优控制问题；自由终端控制是在给定的 t_f 下 $\{X(t_f)\}$ 可以任意取值的最优控制问题；而可变终端控制问题则为 $\{X(t_f)\} \in \{\Psi_f\}$ ，其中：

$$\{\Psi_f\} = \{\{X(t_f)\} | \psi_j(\{X(t_f)\}) = 0\} \quad (4-11)$$

它是由约束条件 $\psi_j(\{X(t_f)\}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (m \leq n)$ 所形成的一个目标集。

不同应用场景下的最优控制问题，所使用的性能指标泛函是不同的。对于结构控制系统，一般性能指标函数表示为如下形式：

$$J = \phi(\{X(t_f)\}) + \int_{t_0}^{t_f} \varphi(\{X(t)\}, \{U(t)\}, t) dt \quad (4-12)$$

上述类型的性能指标称为综合性或博尔赞型性能指标，它由两项组成，等式右边第一项反映对终端性能的要求，称为终端性能指标函数；第二项表示在状态控制过程中对动态 $\{X(t)\}$ 和 $\{U(t)\}$ 的要求，称为动态指标函数^[54]。

倘若不计终端性能指标，则表示为：

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \varphi(\{X(t)\}, \{U(t)\}, t) dt \quad (4-13)$$

综合以上，系统的最优控制问题可以表述为：从所有可供选择的容许控制 $\{U(t)\}$ 中，寻求一个最优控制 $\{U^*(t)\}$ ，使 (4-6) 中表示系统状态轨迹的 $\{X(t)\}$ 从初始状态出发，经过一定时间转移到目标集，并在此过程中使相应的性能指标 J 取极小（大）值。

实际工程应用中，性能指标 J 一般采用如下二次型性能指标：

$$J = \frac{1}{2} \{X^T(t_f)[Q_0]\{X(t_f)\} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\{X^T(t)[Q]\{X(t)\} + \{U^T(t)[R]\{U(t)\}) dt \quad (4-14)$$

式中， $[Q_0], [Q], [R]$ 称为加权矩阵，其中， $[Q_0], [Q]$ 至少为半正定矩阵， $[R]$ 为正定矩阵。

4.3.3 线性二次型经典最优主动控制

一般结构主动振动控制系统为线性非时变结构系统，即系统是由式 (4-2) 所示的状态方程来表示的^[55]，其中矩阵 $[A]$ 和 $[B]$ 为非时变参数矩阵。这时控制系统的性能指标为式 (4-14) 所示的二次型性能指标泛函，这就是现代控制理论中经典线性二次型最优控制，即 LQR 控制。

一般情况下，结构状态最优控制是在无穷时间区间 $[t_0, \infty]$ 内寻求最优控制的，且末态性能指标在 $t_0 \rightarrow \infty$ 时等于零，因此，这里定义终端时间 t_f 为 ∞ ，则系统性能指标泛函为：

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (\{X^T(t)[Q]\{X(t)\} + \{U^T(t)[R]\{U(t)\}) dt \quad (4-15)$$

式中， $[Q]$ 和 $[R]$ 分别是对结构振动响应和控制向量的加权矩阵，且两者均是对称矩阵。

采用数学方式表达，结构主动控制系统最优控制问题可以描述为：

$$\begin{cases} \text{求} & \{U(t)\} \\ \text{Min} & J \\ \text{约束条件} & \{\dot{X}(t)\} = [A]\{X(t)\} + [B]\{U(t)\} + \{P(t)\}, \{X(t)\} = \{X(t_0)\} \end{cases}$$

这样，就把系统最优控制问题转化为了求性能指标 J 极小值的问题。

应用变分法，令 Hamilton 函数为：

$$\begin{aligned} & H(\{X(t)\}, \{U(t)\}, \{\lambda(t)\}, t) \\ &= \frac{1}{2} \{X^T(t)[Q]\{X(t)\} + \frac{1}{2} \{U^T(t)[R]\{U(t)\} \\ & \quad + \{\lambda^T(t)\}[A]\{X(t)\} + \{\lambda^T(t)\}[B]\{U(t)\} \end{aligned} \quad (4-16)$$

式中： $\{\lambda(t)\}$ 为拉格朗日乘子向量。

使 Hamilton 函数 $H(\{X(t)\}, \{U(t)\}, \{\lambda(t)\}, t)$ 取极小值的必要条件是：

协态方程：

$$\{\dot{\lambda}(t)\} + \frac{\partial H}{\partial \{X(t)\}} = 0 \quad (4-17)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \{\lambda(t)\}} - \{\dot{X}(t)\} = 0 \quad (4-18)$$

控制方程：

$$\frac{\partial H}{\partial \{U(t)\}} = 0 \quad (4-19)$$

将式 (4-16) 代入式 (4-18)，即可得出状态方程。

将式 (4-16) 代入式 (4-19)，得：

$$\frac{\partial H}{\partial \{U(t)\}} = [R]\{U(t)\} + [B]^T \{\lambda(t)\} \quad (4-20)$$

因 R 为正定矩阵，则上式可得：

$$\{U(t)\} = -[R]^{-1}[B]^T \{\lambda(t)\} \quad (4-21)$$

由上式即可确定最优控制，为寻求最优反馈需要将 $\{U(t)\}$ 和状态向量 $\{X(t)\}$

联系起来。由式 (4-16) 和式 (4-17)，得到：

$$\{\dot{\lambda}(t)\} = -\frac{\partial H}{\partial \{X(t)\}} = -[Q]\{X(t)\} - [A]^T \{\lambda(t)\} \quad (4-22)$$

式 (4-21) 确定的 $\{U(t)\}$ 是 $\{\lambda(t)\}$ 的线性函数。为了使 $\{U(t)\}$ 能由状态反馈实现，应建立 $\{\lambda(t)\}$ 与 $\{X(t)\}$ 之间的线性变换关系。假设：

$$\{\lambda(t)\} = [P(t)]\{X(t)\} \quad (4-23)$$

将式 (4-23) 代入式 (4-21)，得最优控制力：

$$\{U(t)\} = -[R]^{-1}[B]^T [P(t)]\{X(t)\} \quad (4-24)$$

为求控制 $\{U(t)\}$ 需要求出 $\{P(t)\}$ ， $\{P(t)\}$ 的求法如下所示，

将式 (4-23) 代入式 (4-22), 则式 (4-22) 等号左边为:

$$\{\dot{\lambda}(t)\} = [\dot{P}(t)]\{X(t)\} + [P(t)]\{X(t)\} \quad (4-25)$$

那么, 式 (4-22) 的等号右边为:

$$-[Q]\{X(t)\} - [A]^T \{\lambda(t)\} = -\{[Q] + [A]^T \{P(t)\}\}\{X(t)\} \quad (4-26)$$

将式 (4-25)、(4-26) 代入式 (4-22), 整理得出:

$$\begin{aligned} & \left[[\dot{P}(t)] + [P(t)][A] + [A]^T [P(t)] - [P(t)][B][R]^{-1}[B]^T [P(t)] + [Q] \right] [Q] \\ & + [A]^T \{X(t)\} = 0 \end{aligned} \quad (4-27)$$

根据控制的含义, 当 $t \rightarrow \infty$ 时系统状态应充分接近零状态, 但还不是零状态。那么, 可以得出:

$$[P(t)] \Big|_{t=\infty} = 0 \quad (4-28)$$

上式即为式 (4-27) 求解 $[P(t)]$ 时应满足的边界条件。

式 (4-27) 称为 Riccati 方程, $[P(t)]$ 称为 Riccati 矩阵函数, Riccati 方程是一个非线性的矩阵微分方程。在求解式 (4-27) Riccati 方程时考虑到 $\{X(t)\}$ 的任意性, 则式 (4-27) 可以简化为:

$$\begin{cases} [\dot{P}] + [P][A] + [A]^T [P] - [P][B][R]^{-1}[B]^T [P] + [Q] = 0 \\ [P(t)] \Big|_{t=\infty} = 0 \end{cases} \quad (4-29)$$

由上式求出 $[P(t)]$ 后, 即可得到最优控制力 $\{U(t)\}$ 。

假设:

$$G = [R]^{-1}[B]^T [P(t)] \quad (4-30)$$

最后得到的最优控制的表达式为:

$$\begin{aligned} \{U(t)\} &= -[R]^{-1}[B]^T [P(t)]\{X(t)\} \\ &= -[G]\{X(t)\} \end{aligned} \quad (4-31)$$

式中: $[G]$ 为最优状态反馈增益矩阵, $\{P(t)\}$ 为 Riccati 方程的解。

由式 (4-31) 可以看出, 最优控制 $\{U(t)\}$ 取决于状态反馈 $\{X(t)\}$ 和反馈增益 $[G]$ 。

4.3.4 主动控制算法的 MATLAB 实现过程

MATLAB 全称是 Matrix Laboratory, 是一种功能十分强大, 运算效率很高的专业计算机软件, 主要用于工程科学的矩阵数学运算。MATLAB 软件中有很丰富的函数可以供我们使用选择, 这些函数的调用和运行是通过 MATLAB 自身的语言实现的。函数库中包括很多关于振动控制问题应用的函数, 采用线性二次型最优控制 (LQR) 算法时, 控制过程是采用 MATLAB 语言编程实现的, 其实现过程的主要步骤为:

(1) 通过 ANSYS 软件建立受控结构有限元模型, 然后通过软件提取出受控结构的 M 、 K 矩阵。

(2) 根据运动方程和状态方程的变换关系, 计算出状态空间方程中 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[D]$ 矩阵的表达式。

(3) 在形成的 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[D]$ 矩阵的基础上, 应用 MATLAB 内置函数 $ss()$ 建立结构状态空间模型, $ss()$ 函数调用方法为 $\{X(t)\} = \{ss(A, B, C, D)\}$ 。

(4) 确定权矩阵 $[Q]$ 、 $[R]$ 的取值, 利用 MATLAB 内置函数 $lqr()$ 计算出 LQR 主动控制状态反馈增益矩阵 $[G]$, 其调用方法为 $[G] = lqr(A, B, Q, R)$ 。

(5) 把要施加在结构上的随机干扰, 用 MATLAB 语言读入结构主动控制系统。

(6) 应用 MATLAB 内置的 $lsim$ 求解器计算受控结构在随机荷载作用下的状态反应, 求解器形式为:

$$[[y], \{X\}] = lsim\{([A] - [B][G]), [D], [C_0], [D_0], \{F(t)\}, t\}$$

(7) 观察采用主动控制算法下结构的状态反应, 并利用控制作用下记录的结构状态数据和无控制作用下的结构状态数据, 用 $plot$ 命令绘图, 分析结构控制效果。

4.4 基于 ANSYS 软件的实时跟踪状态主动控制

4.4.1 ANSYS 和 MATLAB 联合实现主动控制

目前关于土木工程结构主动控制的研究主要都是采用 MATLAB 语言编程来实

现的，在通用软件平台上实现结构主动控制是很少的。根据前面讲述的主动控制减振机理，我们知道要实现反馈主动控制，需要通过传感器记录结构在上一个时间点的位移，速度等关于结构状态的信息，控制系统才可以根据控制算法计算出作动器在下一个时间点应该施加给结构的控制力大小。在主动控制数值模拟研究中，这些反馈结构状态的关键信息，是通过 MATLAB 程序中的 `lsim` 求解器计算得来的，`lsim` 求解器是根据构建的结构状态空间信息来计算的。如果建立状态空间模型的信息不准确，那么求解器计算的结构状态信息也就是不准确的。这样看来，能否实现结构最优主动控制就和建立的状态空间模型是否准确有很大的依赖关系，倘若结构状态空间模型建立不准确，计算的结构状态信息就会有很大程度上的失真。对于一些复杂、不规则的结构，建立出准确的结构状态空间模型是很困难的，在这种情况下，再采用 MATLAB 语言编程实现主动控制，其计算结果往往也是不太可靠的。

ANSYS 作为有限元领域的大型通用程序，在结构工程计算，分析等方面有着深入和广泛的应用。ANSYS 软件能够对任何复杂的结构进行计算分析，包括静力分析和动力响应分析等，通过计算，软件能够快速分析出结构受载荷影响的应力应变变化情况，这种分析的结果可以实时的获取结构在外界干扰下的反馈信息，相较于 MATLAB 用 `lsim` 求解器计算的结构状态反馈信息是要准确多的，这种特性正好弥补了 MATLAB 计算中的缺陷，因此，若能够使 ANSYS 计算出的结构状态信息被 MATLAB 读取利用，这样实现的结构主动控制模拟分析将更加真实，结果更加可靠，符合实际。要实现这些数据之间的交流、通讯和共享，使两种大型计算软件协同工作，完成结构的主动控制，有一个前提就是 ANSYS 和 MATLAB 之间要有一个数据共享平台或者相互之间应设置有数据接口实现数据互通。因为在外荷载对结构产生作用的过程中，受控结构的位移，速度，应力等状态信息的变化是一个很快的过程，只有两者之间完成计算数据自动读取，实时计算才能实现真正意义上的主动控制，如果不能实现实时传递，共享数据信息，而是需要待一个软件计算完成之后，再手动完成数据传递工作，这将是一个十分繁琐的过程，而且这种情况下得到的计算结果肯定是和实际情况不相符合的。如果是这样的话，采用这种方式实现结构主动倒还不如直接利用 MATLAB 编程实现更具有实际意义。

事实上，ANSYS 软件和 MATLAB 软件是来自不同的公司的软件，实际应用中，两款软件之间也很少会有一起应用，一起计算而且互相读取数据的情形出现。在 ANSYS 软件中有一个 ANSYS Workbench 工作平台，它是由各种功能丰富的模

块组成。使用 Workbench 仿真平台计算模拟可以实现跟仿真相关的任何技术和数据的实时交流和通讯，这个平台的目的是把所有的数据和技术放在一起协同工作。Workbench 的这种强大的功能和其先进的协同仿真环境思想，若能够在结构主动控制领域实施应用，将会具有深远的意义。可是这个数据共享平台是建立在 ANSYS 自己公司范围内的系统中的，其并没有向 ANSYS 软件公司之外的 MATLAB 软件开放数据接口，所以，ANSYS 软件和 MATLAB 软件之间还是不能实时的实现数据共享。那么要直接利用 ANSYS 和 Matlab 联合计算，实现结构振动主动控制，在这样看来是不能实现的。

虽然两款软件之间没有提供直接的数据接口，但是用户可以对软件进行二次开发来扩大软件的使用范围，通过这种方式实现我们的设想。有限元分析软件 ANSYS 其实是两部分组成的，一部分是 ANSYS Workbench，另一部分是经典 ANSYS。已经知道，Workbench 平台不能提供和 MATLAB 软件共享数据的接口，那么我们这里采用经典 ANSYS (ANSYS Mechanical APDL) 中的 APDL 工具来编制程序，对 ANSYS 软件进行二次开发，来实现数据的共享。

4.4.2 APDL 参数化设计语言

APDL 是 ANSYS Parametric Design Language 的简称^[56]，即 ANSYS 参数化设计语言，它是一种类似 FORTRAN 的解释性语言，提供一般程序语言的功能，如参数、宏、标量、向量及矩阵运算等。APDL 是为了使有限元分析中对模型重复建模以及重复后处理等需要反复操作的命令进行简化而设计的一种工具，通过使用这种简化工具对结构分析进行设计，可以使程序自动的完成重复操作。APDL 是一种解释性文本语言，有顺序、选择、循环及宏等结构，包括变量、数组与表参数及其用法、数据文件的读写、数据信息的访问、数学表达式、使用函数编辑器和加载器、矢量与矩阵运算、APDL Math、内部函数、流程控制、宏与宏库，以及定制用户图形界面这些技术要素^[57]。我们利用 APDL 提供的这些语言将 ANSYS 命令组织起来，并利用参数实现数据的交换和传递，实现有限元分析过程的参数化和批处理，使软件能自动的执行某些功能和建模，从而实现有限元分析的全过程^[58]。通过合理的运用这些技术要素对 ANSYS 进行二次开发，可以极大地提高软件的应用范围和计算分析效率。

4.4.3 ANSYS 和 MATLAB 联合计算分析过程及要点

使用 ANSYS 对结构进行有限元分析计算的操作流程一般是这样的：建立结构

模型，划分网格，施加约束，加载荷动力分析，计算结果分析与处理。

采用 MATLAB 语言编程，应用 LQR 最优主动控制律进行结构振动反馈控制时，编程计算的步骤参照前面内容，简单的说，就是利用 MATLAB 内置 $lqr()$ 函数确定最优控制状态反馈增益 $[G]$ ，然后据结构实时状态反馈信息计算作动器的出力大小，再由作动器施加在结构上^[59]。

通过对两种软件工作方式的了解，可以看出，要想实现 ANSYS 和 MATLAB 之间数据共享，我们需要解决以下几个问题：

(1) ANSYS 中每施加一次载荷，完成一次结构动力分析，便会形成一组关于结构反应的数据信息。同时，MATLAB 每完成一次计算，也会生成一组控制力数据。那么，怎么使 MATLAB 计算的控制力数据在下次动力反应分析中和载荷一起施加在模型上，以及 MATLAB 计算控制力数据的时候通过什么方式来读取所需要的由 ANSYS 分析计算得到的结构状态信息，这是个很关键的问题。

(2) 施加给结构的载荷是每时每刻都在变化的，结构在分析完成上一个时间点加载的载荷后，需要完成一个结果数据储存的过程，以被下一时间点由 MATLAB 读取。完成数据存储工作之后，结构在施加下一个时间点的载荷时，又需要重新开始分析。如果每次施加载荷 ANSYS 都需要重新计算一次，这样就使软件计算开销很大，计算效率降低，因此这个也是编程计算中要解决的一个重要问题。

(3) 实际模拟中，MATLAB 和 ANSYS 两个软件是独立运行计算的，但是 MATLAB 和 ANSYS 两个软件在计算中读取数据是有先后顺序的，即需要待其中一个软件运行结束后，另一个软件需要根据另一个软件计算的数据结果才能进行下一步的计算。那么，软件运行顺序的控制也是一个很关键的问题。

对于第一个问题，我们利用 APDL 参数化语言设计以及 MATLAB 语言编程来解决。其实这个问题涉及到两个方面，一方面是关于 ANSYS 计算数据的存储和读取，另外一方面就是关于 MATLAB 计算数据的存储和读取。关于这两个方面的问题，这里我们分开来讲。

一方面，ANSYS 动力响应时程分析后，关于结构状态的结果数据需要存储起来，供 MATLAB 后面的计算读取，应用。首先通过使用 *GET 命令把需要的结果数据从软件中读出，这里的 *GET 命令是一个非常强大的命令，它几乎可以读取 ANSYS 数据库中的任何数据，包括任何对象（点、线、面、节点、单元等）的相关数据信息以及个处理器的设置或状态数据信息等。因为结果数据需要被

MATLAB 在计算控制力中再次使用，为了方便被 MATLAB 识别，这里应用一个文本文件作为暂时中转，因为 ANSYS 每次计算完数据会有更新，所以不能长期存储，数据只能暂时保存。然后利用 APDL 中的 *VWRITE 命令，把得到的数据文件写入中转文本文件中，这样就把由 ANSYS 计算得出的结果数据便存储好了而且可以被 MATLAB 后续的计算所应用。这里使用的 *VWRITE 命令可以把计算得到的数据文件写出并用于其他程序和报告文件。这里需要注意，在 *VWRITE 命令执行之前必须利用 *CFOPEN 命令打开中转文本文件，并将 *CFOPEN 和配对使用的 *CFCLOS 之间 *VWRITE 命令写出的数据文件都输入到该中转的文本文件中^[60]。ANSYS 把计算结果数据保存好之后，MATLAB 在计算反馈控制力的时候，使用 MATLAB 语言“txtread”命令，便可以把要应用的结构状态反馈信息读入软件中计算控制力了。

另一方面，就是 ANSYS 怎么读取 MATLAB 根据计算得到的，在下个时间点和随机载荷一起施加在结构上的由作动器出力的控制力数据。首先，和前面一样，为了方便数据被 ANSYS 读取，这里也使用中转文本文件对计算数据进行保存，然后通过 MATLAB 语言中的 SAVE 命令把计算结果保存该中转文本中，这样就完成了 MATLAB 计算数据的存储工作。同时 ANSYS 使用 *VREAD 命令就可以把所需要的控制力数据给读取了，APDL 中的 *VREAD 命令的功能是读入数据文件中的数据并用来填充已定义的数组参数。但是要注意的是，MATLAB 存储在中转文件中的控制力数据必须转化成 ASCII 格式的，因为使用 APDL 中的 *VREAD 命令读取数据时，只有 ASCII 格式的数据才能被读取。通过对 MATLAB 简单编程和使用 APDL 这样就实现了 MATLAB 和 ANSYS 的数据共享。

通过以上对两种软件关于数据的读取和存储的分析，应用 APDL 和 MATLAB 编程，就可以实现程序计算中数据信息的实时共享和互通了。

对于第二个问题，我们也是应用 APDL 参数化编程来解决的。通过参数化编程，把所要施加的载荷以数组参数的形式进行加载，实现软件自动读写，自动加载，自动分析处理。数组作为参数的一种类型，可以作为命令的值域或在交互界面的输入框中替代各种具体的数值和字符串参与到有限元计算中去。所以，可以把随机加载在结构上的载荷定义为 ARRAY 型数组或者 TABLE 表型数组以参数的形式加载在结构上，其中 ARRAY 数值型数组是默认的数组类型，用于存储整形或实型数据。TABLE 表型数组是一种特殊的数值型数组，用于存储整数或实数并且可以实现在数组元素之间的线性差值算法。实际中的随机载荷是任意分布的，应

用 TABLE 表数组参数进行处理更为方便一些, 因此, 一般应用 TABLE 表数组参数的比较多一些, 本文也是采用 TABLE 数组参数。

利用 APDL 中的 *DIM 命令可以定义 TABLE 数组参数^[61], 命令格式为: *DIM,Par,Type,IMAX,JMAX,KMAX,Var1,Var2,Var3, 其中, Par 是定义的数组名称, 可以自己任意定义; Type 是数组类型, 即是 TABLE 型或者 ARRAY 型等; IMAX,JMAX,KMAX 分别是数组下标的最大值, Var1,Var2,Var3 是在 Type=TABLE 时的对应行、列和面的变量名。定义完 TABLE 数组参数之后, 再使用 *TREAD 命令把所要施加在结构上的随机载荷数据赋值给 TABLE 数组。这样就完成了参数化载荷的定义。在编辑命令流进行动力响应时程分析时, 只需要使用已经定义完成的 Par 这个数组参数参与计算, 程序便会根据数据的时间点来对应相应的数据, 实现自动读取需要加载的载荷, 完成计算分析。

针对第三个问题, 这里创新的引入了标志寄存器 PSW (Program Status Word) 进行观测程序运行状态以及对程序运行结果的某些特征, 作出判断并发出指令, 控制程序的运行顺序。这里我们把标志寄存器文件定义为 FLAG 文件, 可以这样设定: 当 FLAG 文件等于 0 的时候, ANSYS 运行, 当 FLAG 文件等于 1 的时候, MATLAB 运行; 反之, 也可以定义为当 FLAG 文件等于 0 的时候, MATLAB 运行, 当 FLAG 文件等于 1 的时候 ANSYS 运行。同时, 利用 APDL 中的 *DOWHILE-*ENDDO 循环命令和 FLAG 文件一起完成程序运行控制。*DOWHILE 循环又称重复执行循环体, 这种循环体是通过判断某一控制参数是否改变来完成循环或终止。*DOWHILE 命令的使用格式为: *DOWHILE, Parm, 其中, Parm 是循环判断条件, 如果 Parm 为真则执行下一次循环, 如果 Parm 为假, 则循环中止。这样通过引入 FLAG 文件状态标志寄存器来观测程序运行情况, 便可以实现 ANSYS 和 MATLAB 两款计算软件之间的有序进行, 实现 ANSYS 和 MATLAB 模拟结构最优主动控制。

4.4.4 ANSYS 和 MATLAB 联合实现输电塔结构风振主动控制

输电塔结构是属于结构复杂的高耸结构物, 对风荷载作用十分敏感, 在风荷载作用下, 很容易发生大的偏移。根据前面章节已模拟出的输电塔结构风荷载时程曲线和已经完成的输电塔结构有限元模型, 本节利用 LQR 最优控制算法, 采用以上分析的 ANSYS 和 MATLAB 并行计算的方法实现输电塔结构风振响应主动控制的编程过程, 以及对应用这种方法实现的主动控制效果进行分析。

在计算分析之前，需要先确定结构状态反馈计算中计算控制力大小的结构状态反馈增益矩阵 $[G]$ 。状态反馈增益矩阵 $[G]$ 可以通过状态空间方程中的 $[A]$ ， $[B]$ ， $[C]$ ， $[D]$ 四个矩阵通过 lqr 函数计算出来，这四个矩阵根据输电塔结构中作动器的位置和风荷载作用位置以及结构初始状态的刚度和质量矩阵来确定。初始状态的结构刚度、质量矩阵可以用 ANSYS 软件很方便的提取出来，这里不再赘述。此处主要说明作动器的布置和风荷载作用的位置信息。

前面章节模拟风速时程时，把输电塔架简化为了 8 段，并取每段的中心点为风速时程模拟点，得到了 8 个点的风速时程，所以在加载的时候，我们需要根据这 8 个风速时程为依据进行加载，故这里风荷载加载点仍然取 8 段塔架结构的中心点。考虑到在使用 ANSYS 软件分析控制作用时，作动器的反馈控制力能和风荷载作用相当且在同一位置点处，因此采用图 4.4 (a) 所示的作动器布置方式。因为实际加载点和控制力作用位置只有 8 个模拟点，所以把图 (a) 所示实际结构简化为图 4.4 (b) 所示意的模型结构进行计算。

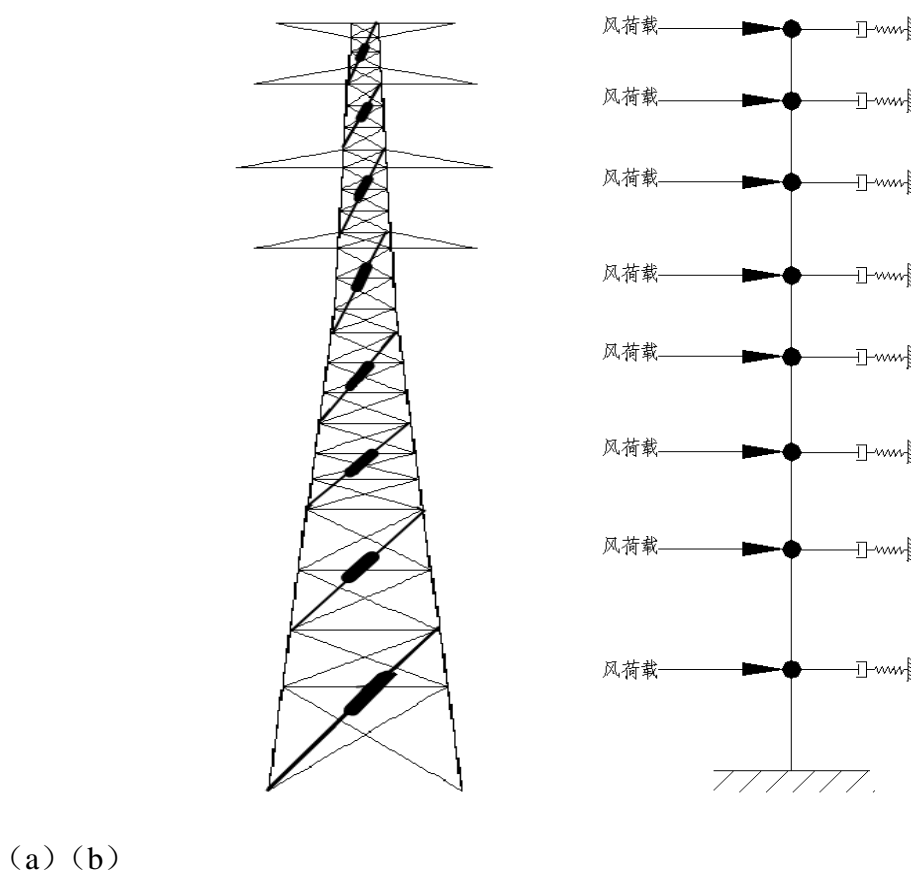


图 4.4 风荷载和作动器作用位置示意

(a) 实际结构布置作动器位置，(b) 简化的控制结构模型

关于模拟中使用的作动器，本文选用具有磁致伸缩效应的 GMM (Giant

Magnetostrictive Material) 作动器作为出力装置布置在结构上。磁致伸缩效应是指作动器磁化状态的改变会导致其在长度、体积或形状上发生相应变化的一种现象。研究发现, GMM 具有磁致伸缩应变变量值大、能量转换效率高、能量密度大、工作驱动电压低、响应速度快、承载能力强等优良特性, 较为适宜用于空间网格结构的主动振动控制。本课题组的苗璐璐^[62]对具有磁致伸缩效应的 GMM 作动器的出力效果已经做出过实验研究, 实验数据显示, 采用带套筒装置直径为 10mm, 长度为 60mm 的 GMM 作动器, 其最大可以提供 2033N 的出力, 由此可见这种作动器占用很小的体积便能实现很大的出力, 很适合在输电塔结构中使用。鉴于本文施加的风荷载数值较大, 因此采用直径为 20mm, 长度为 80mm 的 GMM 作动器作为出力装置设置在输电塔架结构上。

根据以上提供的信息便可计算出状态空间的[A], [B], [C], [D]矩阵, 然后按照 MATLAB 内置函数 ss() 的格式输入 ss(A, B, C, D), 便建立起状态空间模型中结构状态方程, MATLAB 中 ss() 函数建立的状态方程形式如下所示:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A]x(t) + [B]U(t) \\ Y(t) = [C]x(t) + [D]U(t) \end{cases}$$

建立状态方程之后, 利用内置函数 lqr(), 输入 lqr(A, B, Q, R) 便可以确定 LQR 中的最优主动控制状态反馈增益矩阵[G]。

在这里选择权矩阵 Q 和 R 分别为:

$$Q = 100 \begin{Bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{Bmatrix}, \quad R = 8 \times 10^{-6} I$$

到这里基本上已完成 MATLAB 语言编程的大部分内容, 由于结构的主动控制力是根据 ANSYS 计算分析后的结构状态信息反馈才能计算获得, 所以, 下面介绍利用 ANSYS 计算分析获得结构的状态反馈信息的具体实现方法。

因前面章节已经在 ANSYS 软件中建立了输电塔结构的有限元模型, 因此在这里关于用命令流建立结构模型的内容就不再赘述, 重点讲述参数化编程的实现。关于施加的风荷载载荷的参数化编程, 首先把采用时程分析法模拟得到的风荷载数据从 MATLAB 结果数据中提取出来, 手动保存在文本文档中, 然后使用*DIM 命令定义 TABLE 型数组参数, 并使用*TREAD 命令把已保存的风荷载数据赋值给 TABLE 数组参数。APDL 实现方式如下:

*dim,fhz,table,nl,8,1 ! 定义新的 TABLE 数组, 名称为“fhz”

*tread,fhz,fenghezai,txt ! 把模拟出的风荷载写入“fhz”数组参数中

施加载荷时,只使用已经定义好的 TABLE 数组参数“fhz”做为随机干扰加载在结构上,以后的每次加载计算就会按照时间点对应的顺序自动完成加载,这样便完成了载荷的参数化加载。

当瞬态动力时程分析计算完成后,利用*GET 命令提取结果数据,然后用*VWRITE 命令把位移状态信息等写入由*CFOPEN 打开的中转文本文件中。

APDL 命令实现如下:

*get, jisuanweiyi(1,1),node,1,u,y ! 提取节点 y 向位移

*c fopen, C:/Users/gaomingshang/Desktop/gaomingshang/fankui,txt

*vwrite, jisuanweiyi ! 写入位移结果数据

*cf clos

由于风荷载在时域范围内是随机变化的,故 ANSYS 每次动力计算分析完成后就会重新加载一组新的数据,所以这里的“fankui.txt”是一个动态的数据,每时每刻都在发生改变。文本文件里面的结果数据在每次变化之前,程序设计由 MATLAB 使用“textread”命令读取其中的信息计算出控制力的大小之后,再更新其中的反馈数据。

MATLAB 软件根据 MATLAB 语言“textread”读取结构状态信息之后,根据(4-31)式,即 $\{U(t)\} = -[G]\{X(t)\}$,便可计算得到最优主动控制力 $\{U(t)\}$ 。这时使用 MATLAB 中的“SAVE”命令,把计算的结果数据存储在 ASCII 格式的文本文件中,供下一步 ANSYS 加载读取, MATLAB 语言编程实现如下:

x=load('C:\Users\gaomingshang\Desktop\gaomingshang \fankui.txt');

%读取状态反馈信息

Save(C:\Users\gaomingshang\Desktop\gaomingshang\zhudongkongzhili.txt-ascii)

%保存为 ASCII 格式的主动控制力

在 MATLAB 计算完成后,需要由 ANSYS 在下次计算中读取计算的主动控制力,这里读取数据的方法和前面赋值给风荷载数组参数的方法类似,即采用*VREAD 命令把记录在文本文件中的控制力数据读取到 ANSYS 程序中。

APDL 命令如下:

*vread, zhudongli ,C:/Users/gaomingshang/Desktop/gaomingshang/zhudongkongzhili,txt

实际操作中, MATLAB 和 ANSYS 两个软件在计算机中都打开了且同时在后

台运行计算，但数据的交换是有先后顺序的，因此这里引入状态观测寄存器来控制结构的运行和计算。其中在 MATLAB 软件中定义 FLAG 文件并使用“WHILE 循环判断语句”来控制 MATLAB 的运行，定义当 FLAG 文件等于 1 时，软件开始运行，计算控制力；当 FLAG 文件等于 0 时，软件停止运行。命令实现方式为：

```
while flag<=1
switch flag
case 0
pause(3)
case 1
run
end
end
```

同样地，在 ANSYS 软件中利用 APDL 中的“*DOWHILE 循环”和 FLAG 文件控制计算流程，在 ANSYS 中定义当 FLAG 文件等于 1 时，ANSYS 停止运行；当 FLAG 文件等于 0 时，软件开始施加载荷进行瞬态动力学分析。通过这样的设定，程序便可以自动的按照先后顺序计算下去了。

以上即是对两款软件的编程和整个计算控制流程的全过程。下面通过使用 MATLAB 和 ANSYS 的并行计算，对输电塔结构进行主动控制，在计算中每次加载的步长取为 0.02s，这样计算出的结果更为精确。由于两款软件都是大型软件，在计算中很耗费计算机资源，所以仅选取计算了前 30s 风速时程下结构在无控作用和有控作用下的位移和速度反应，列于图 4.5—4.36 中。

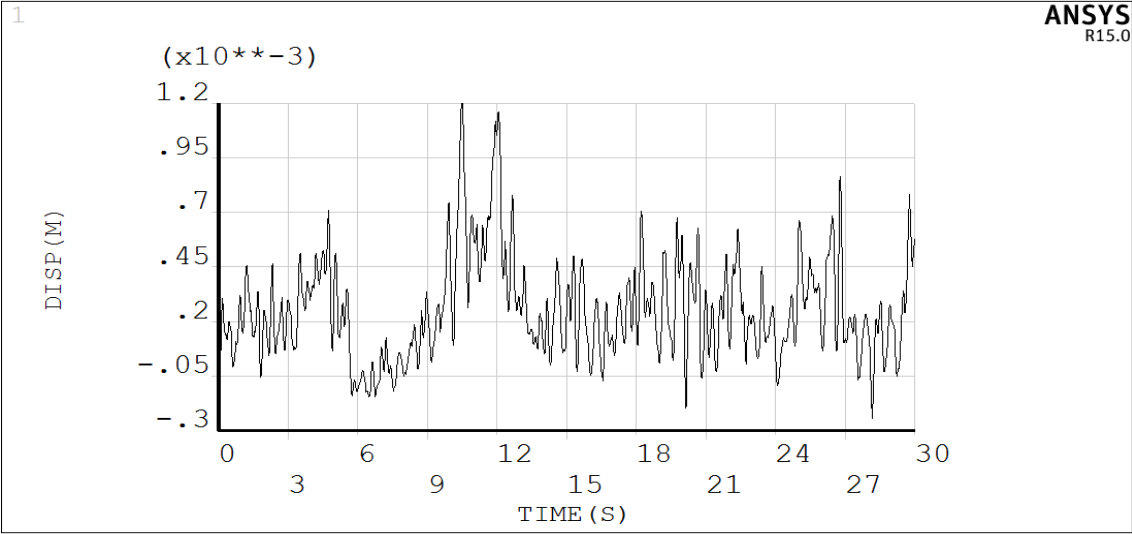


图 4.5 无控制时 1 号模拟点位移响应时程

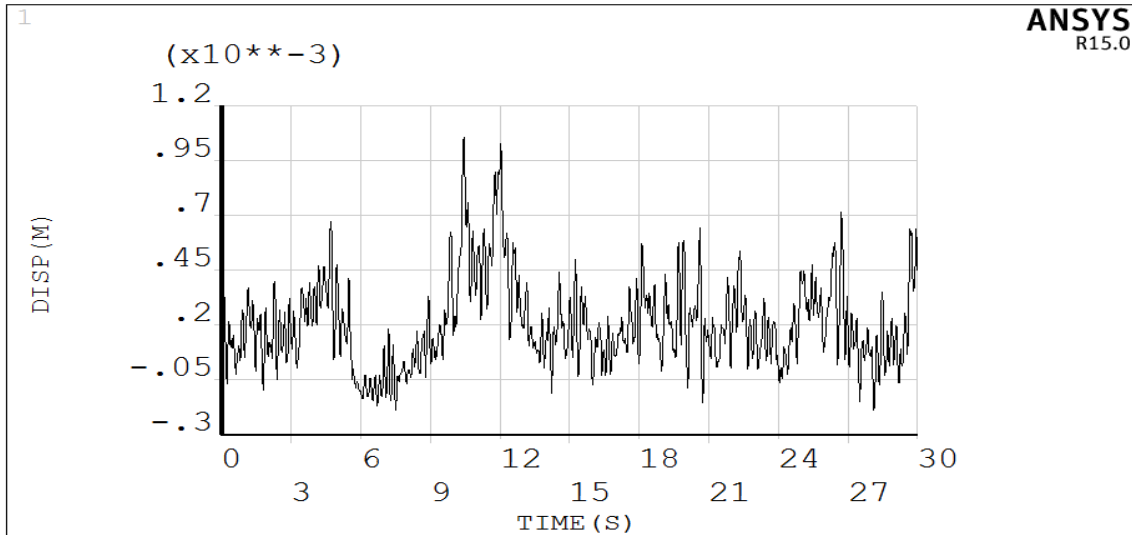


图 4.6 有控制时 1 号模拟点位移响应时程

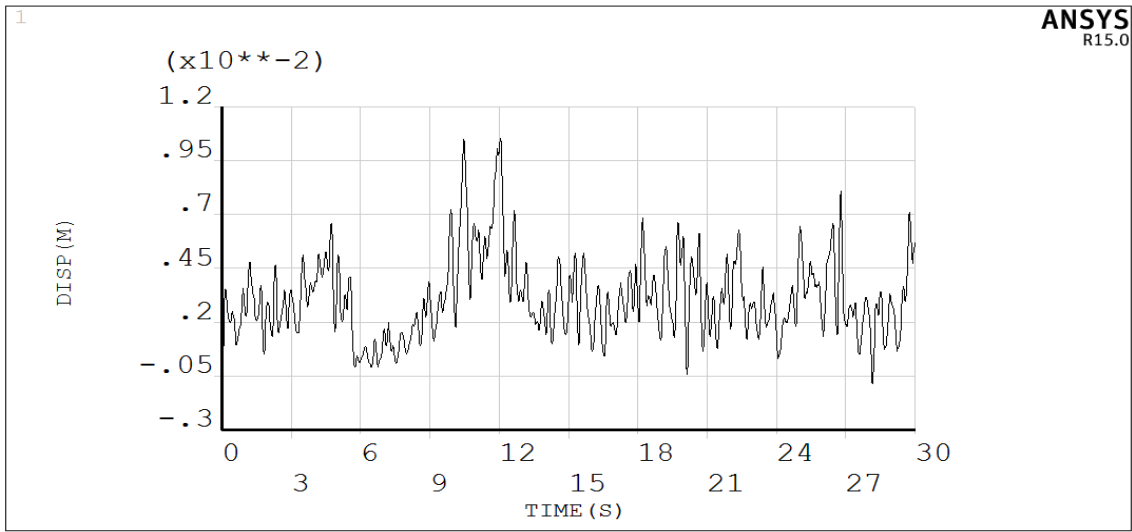


图 4.7 无控制时 2 号模拟点位移响应时程

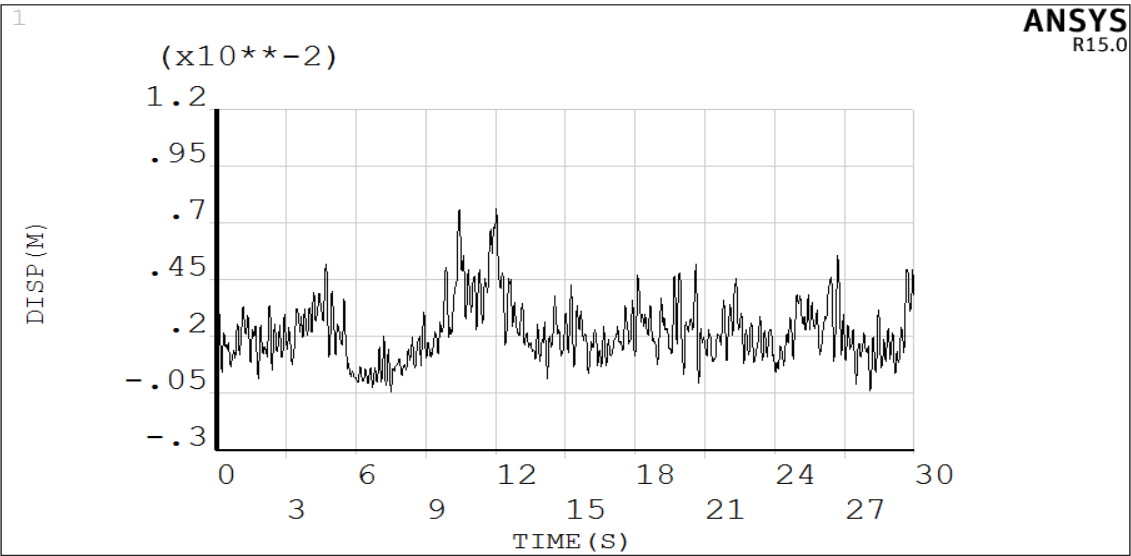


图 4.8 有控制时 2 号模拟点位移响应时程

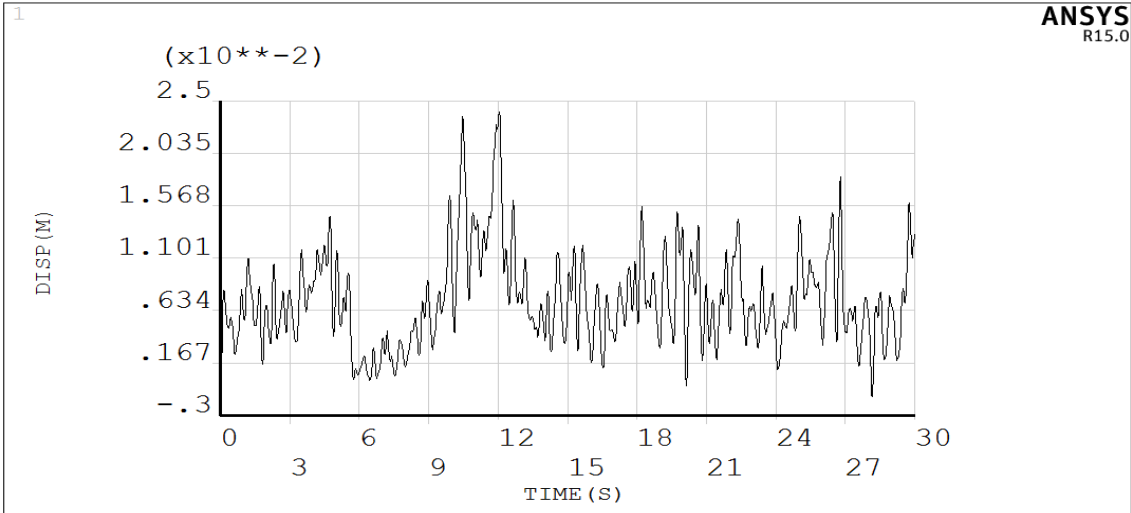


图 4.9 无控制时 3 号模拟点位移响应时程

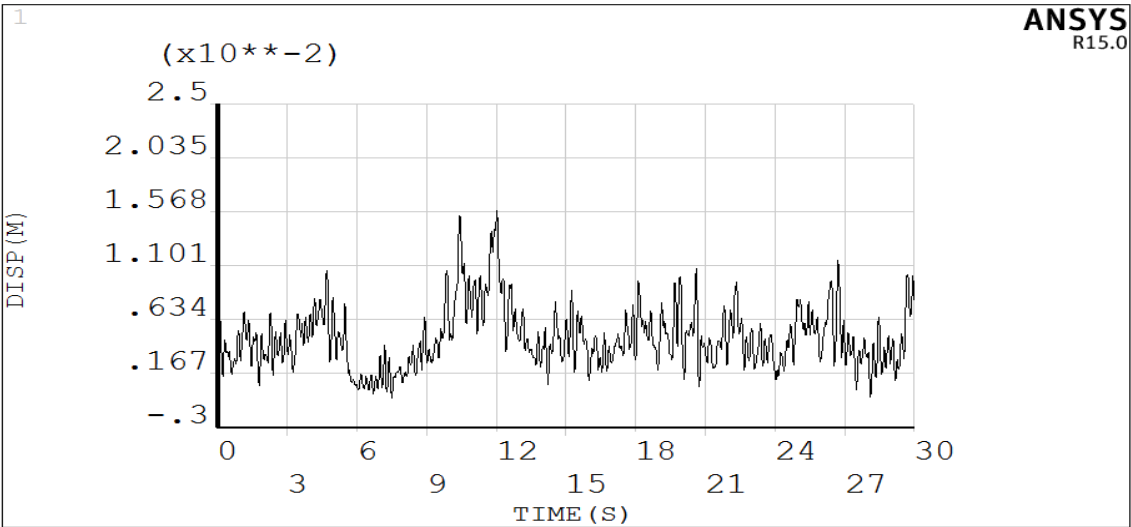


图 4.10 有控制时 3 号模拟点位移响应时程

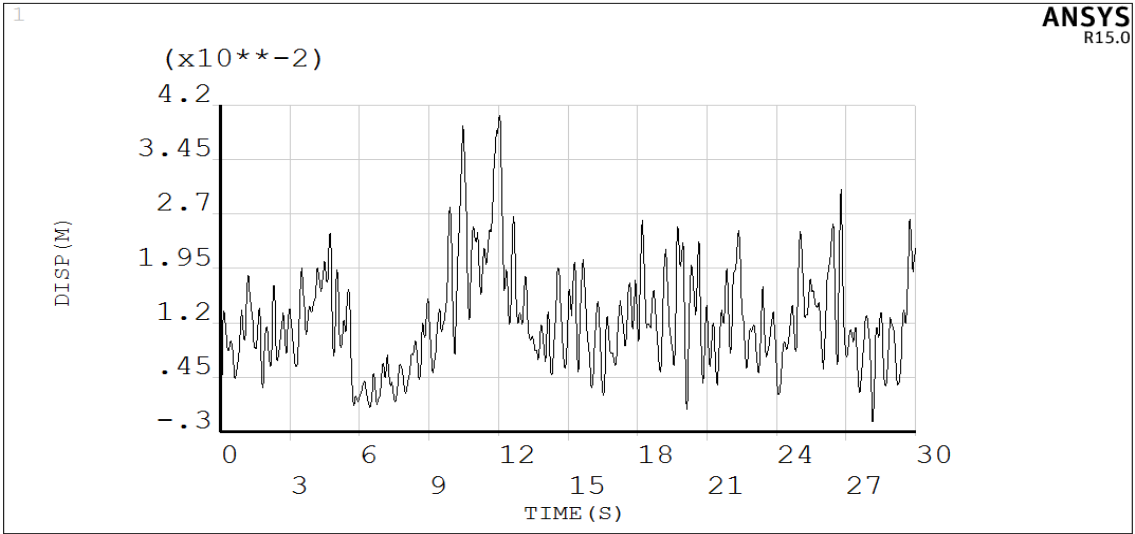


图 4.11 无控制时 4 号模拟点位移响应时程

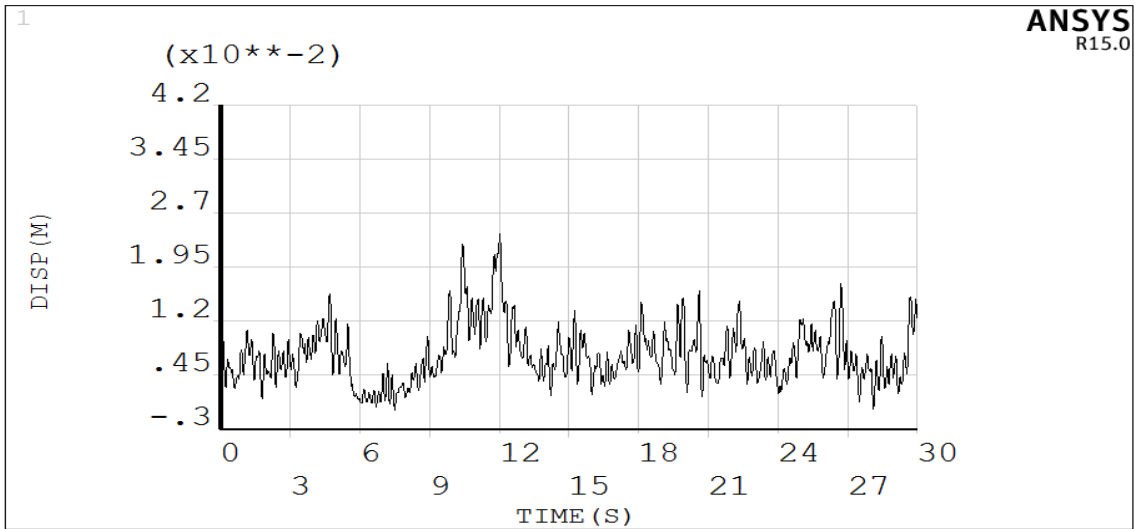


图 4.12 有控制时 4 号模拟点位移响应时程

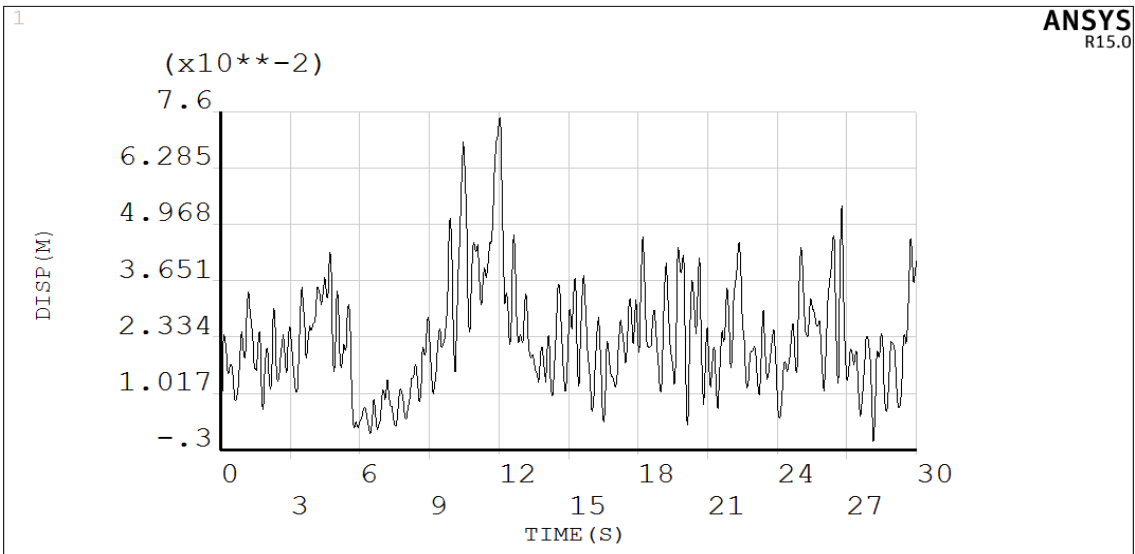


图 4.13 无控制时 5 号模拟点位移响应时程

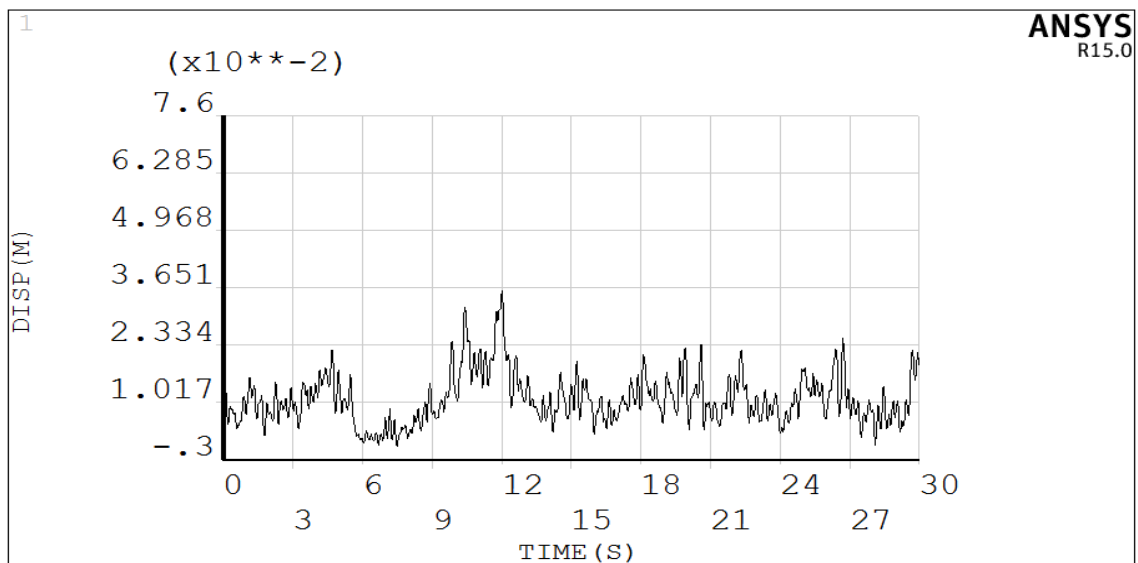


图 4.14 有控制时 5 号模拟点位移响应时程

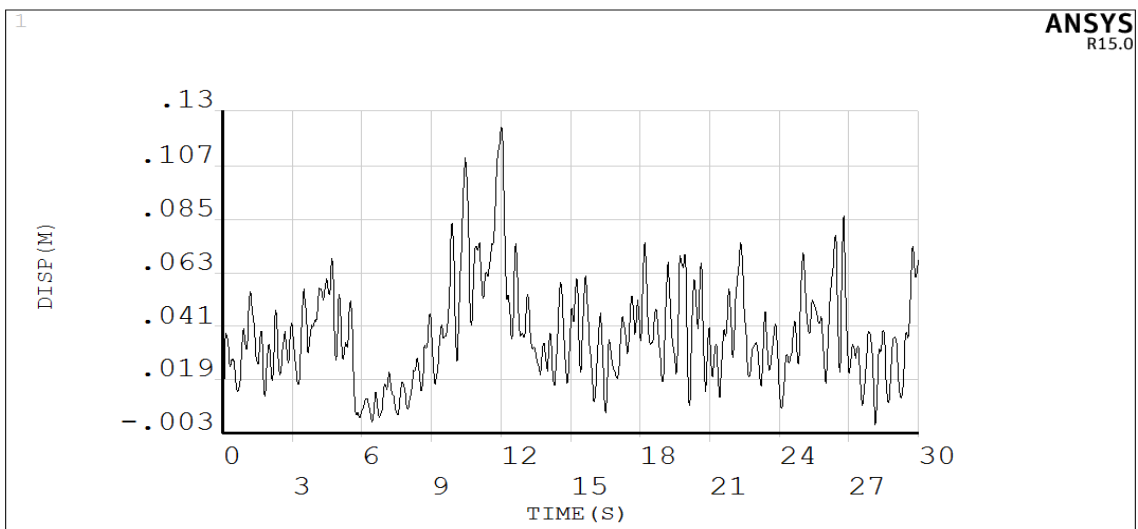


图 4.15 无控制时 6 号模拟点位移响应时程

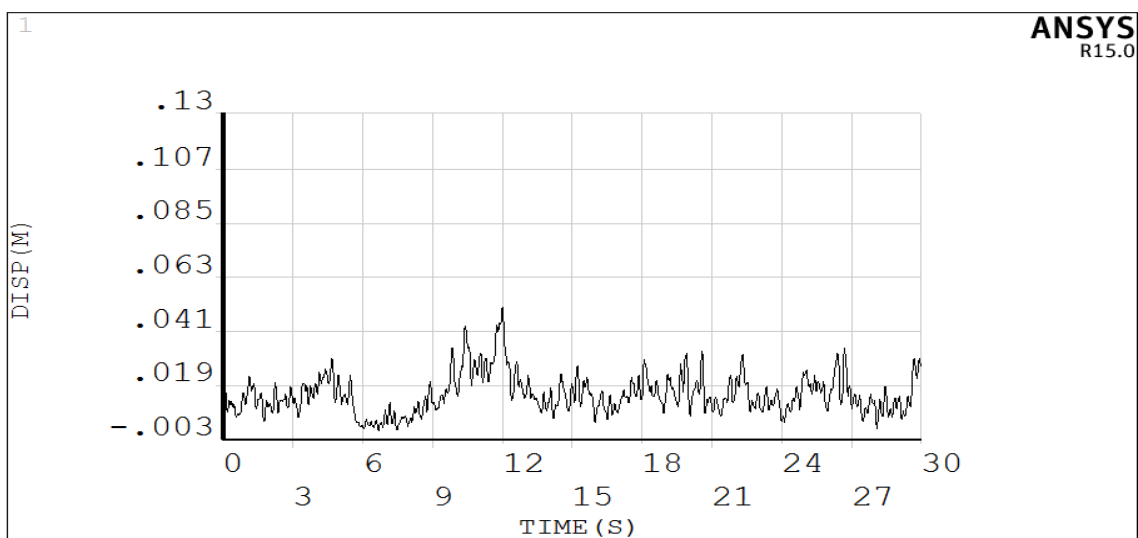


图 4.16 有控制时 6 号模拟点位移响应时程

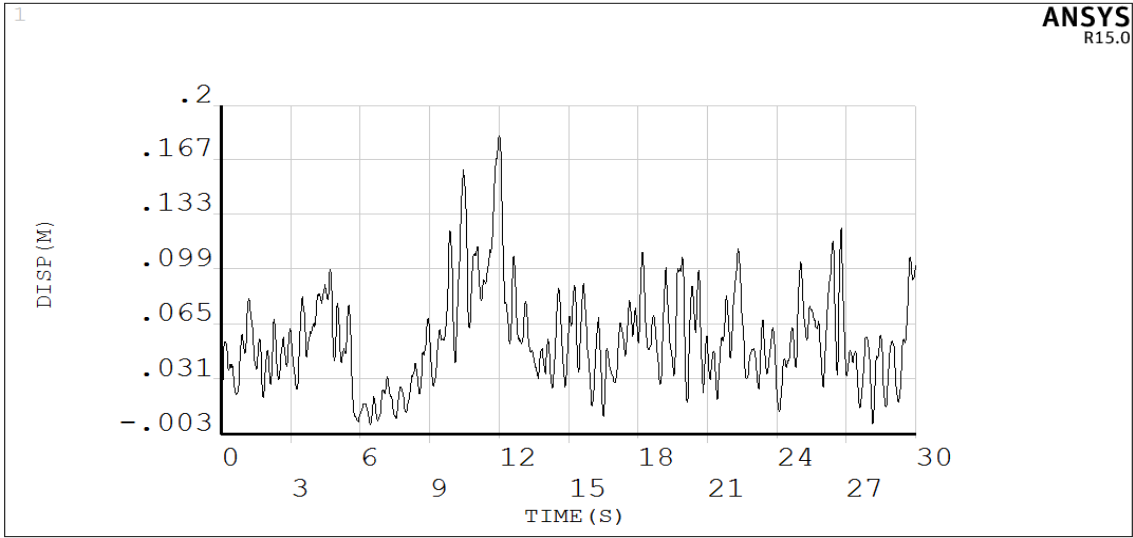


图 4.17 无控制时 7 号模拟点位移响应时程

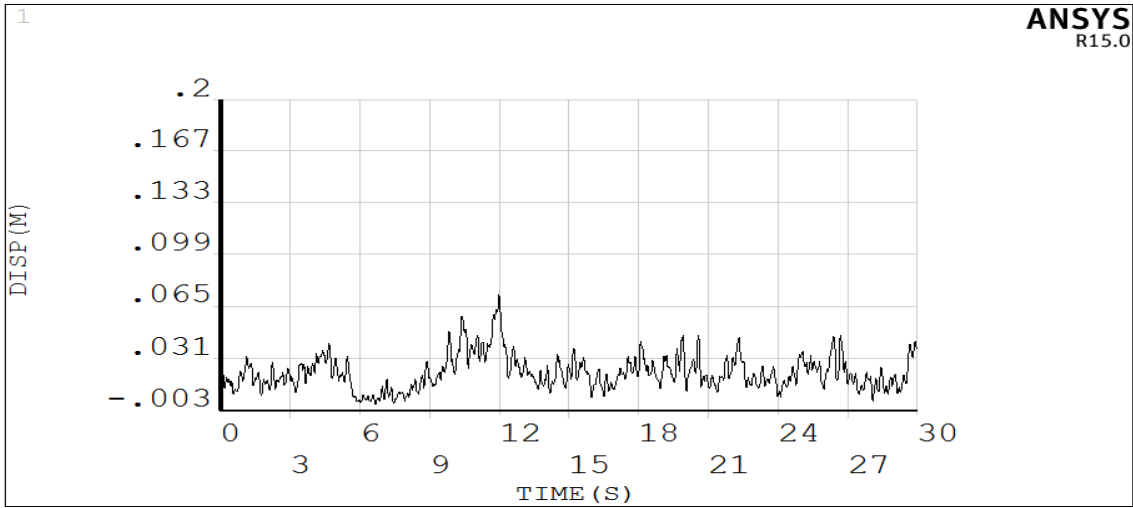


图 4.18 有控制时 7 号模拟点位移响应时程

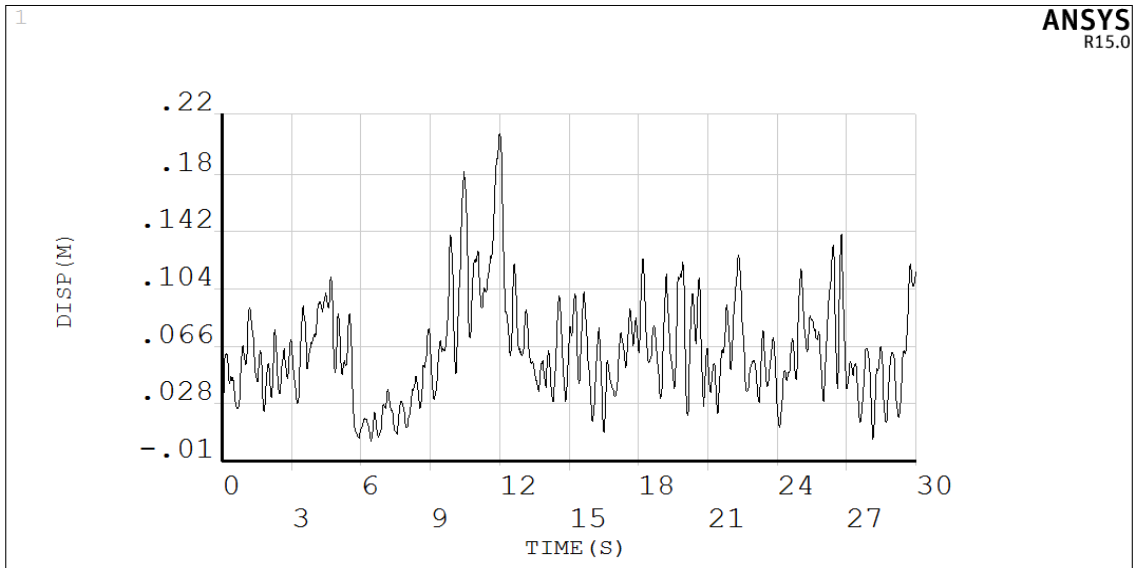


图 4.19 无控制时 8 号模拟点位移响应时程

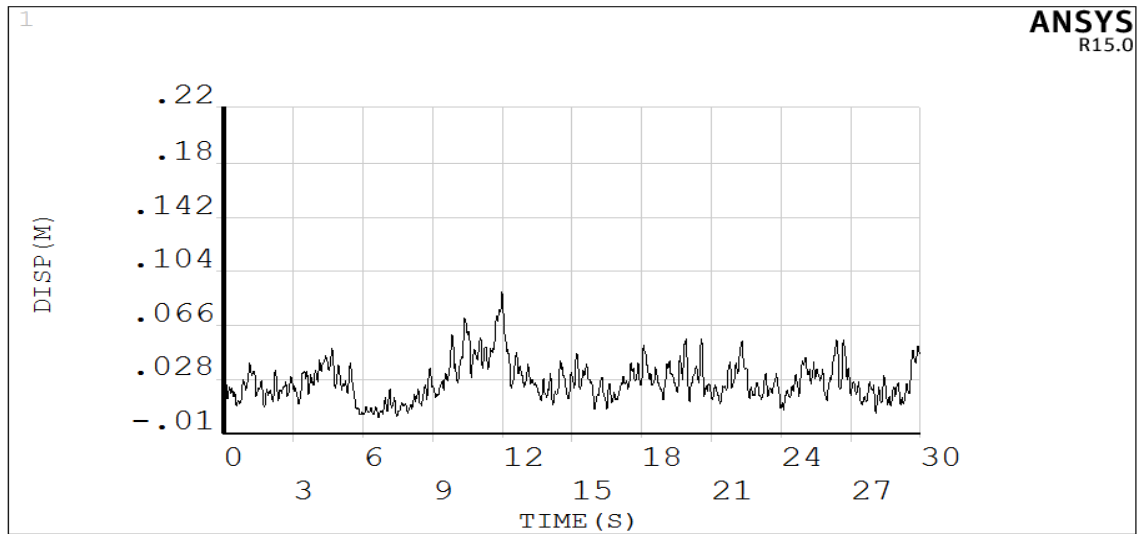


图 4.20 有控制时 8 号模拟点位移响应时程

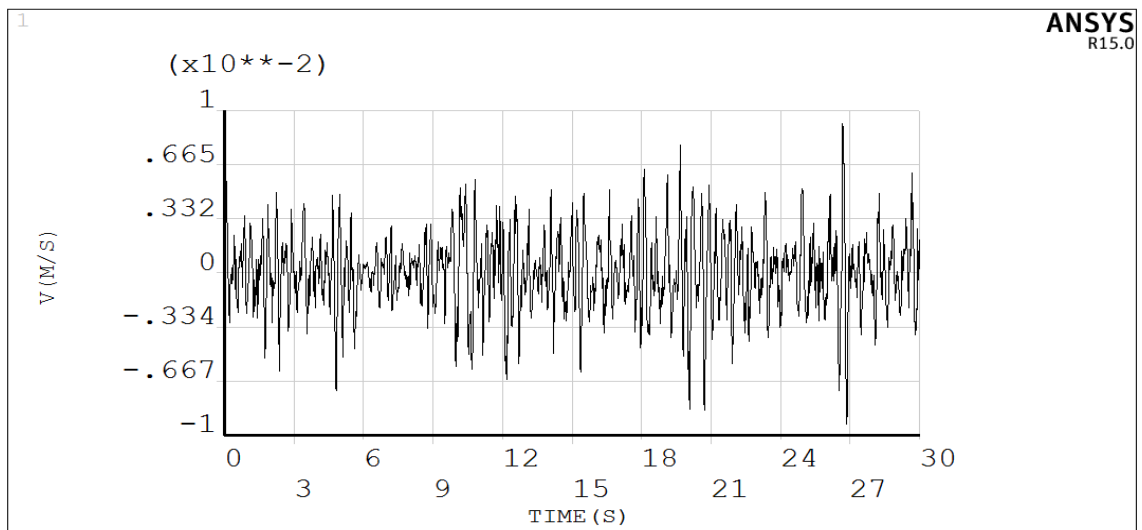


图 4.21 无控制时 1 号模拟点速度响应时程

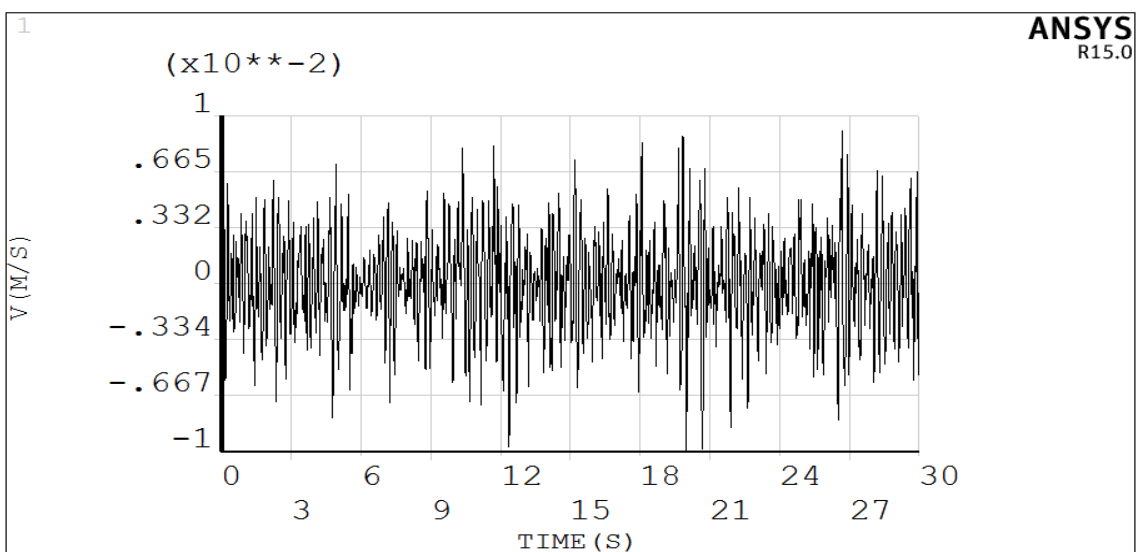


图 4.22 有控制时 1 号模拟点速度响应时程

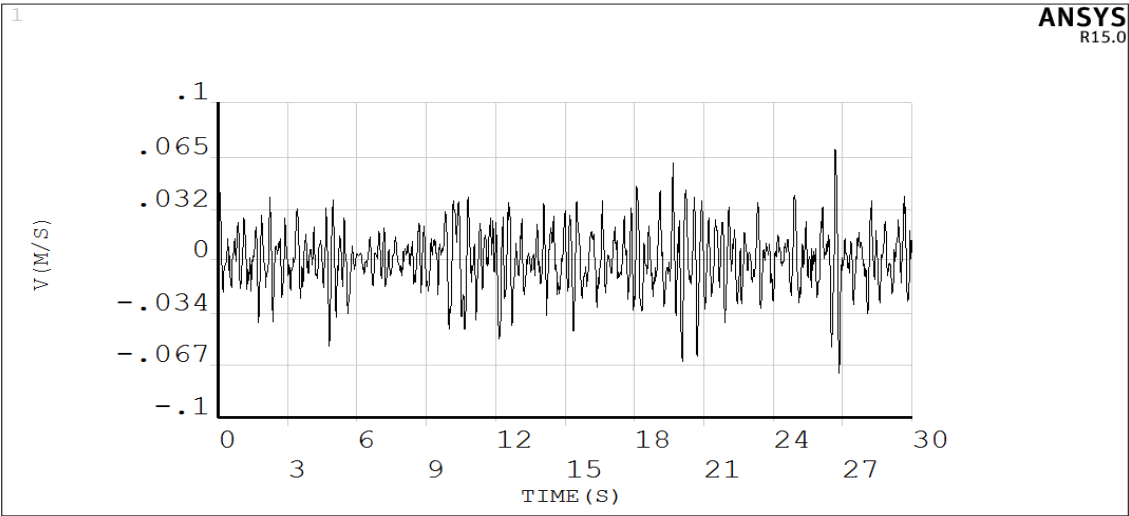


图 4.23 无控制时 2 号模拟点速度响应时程

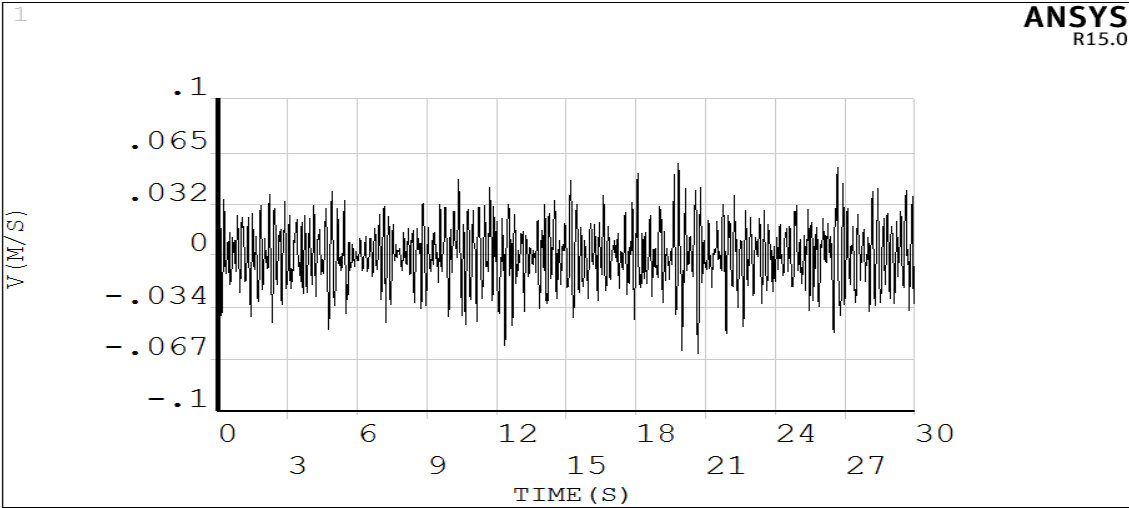


图 4.24 有控制时 2 号模拟点速度响应时程

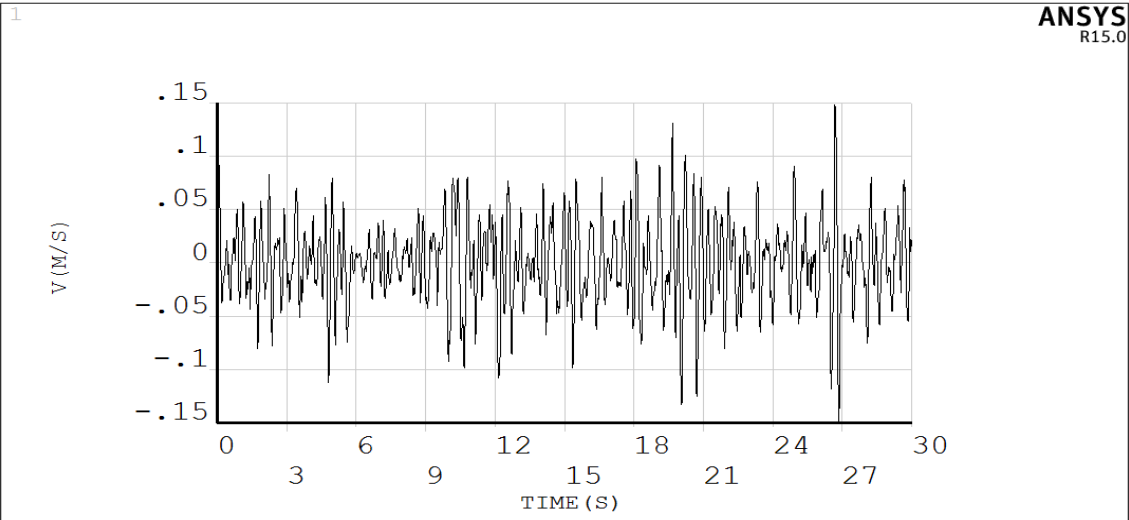


图 4.25 无控制时 3 号模拟点速度响应时程

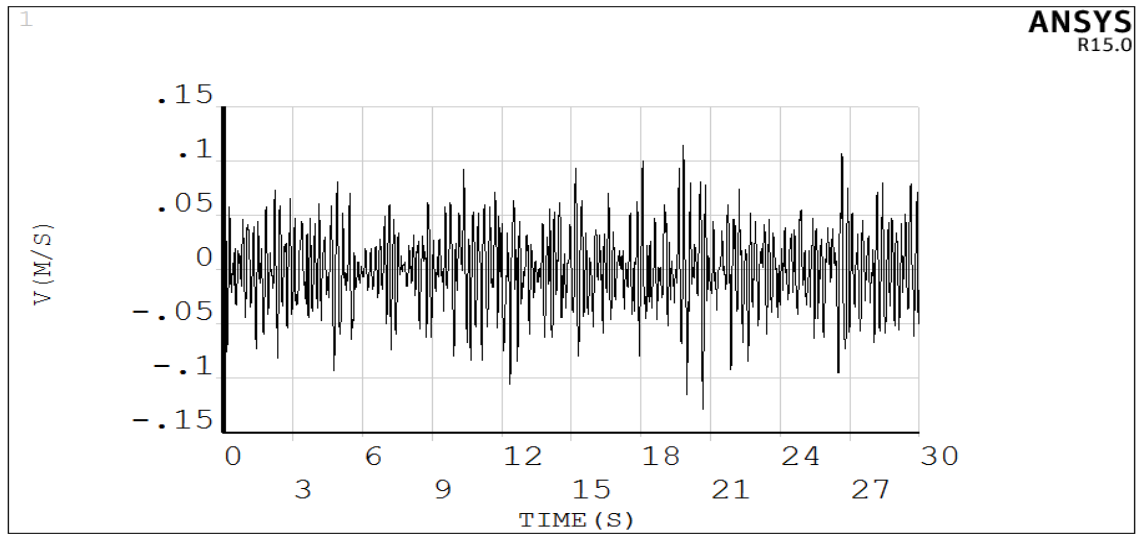


图 4.26 有控制时 3 号模拟点速度响应时程

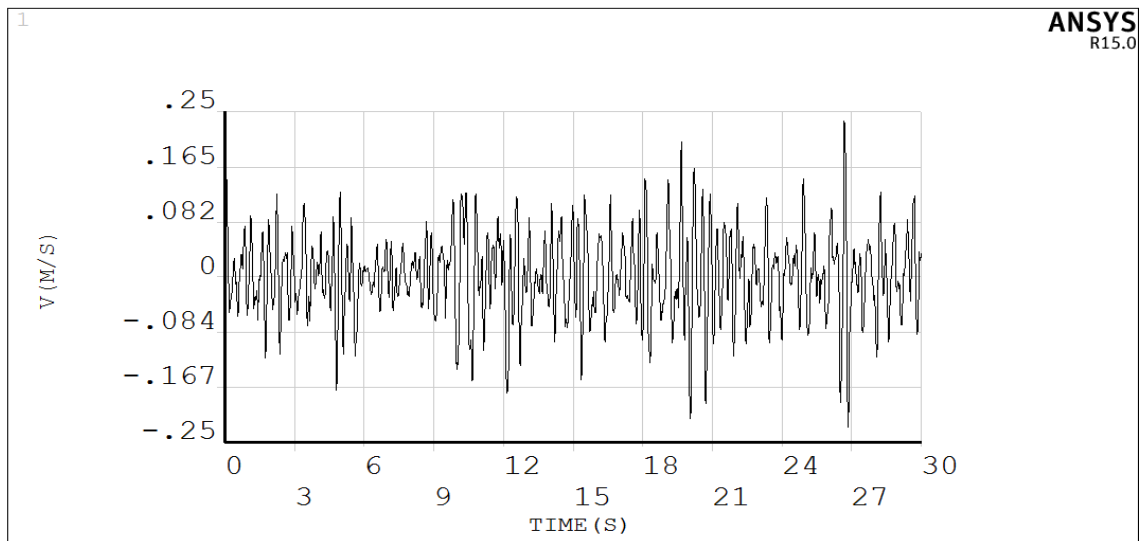


图 4.27 无控制时 4 号模拟点速度响应时程

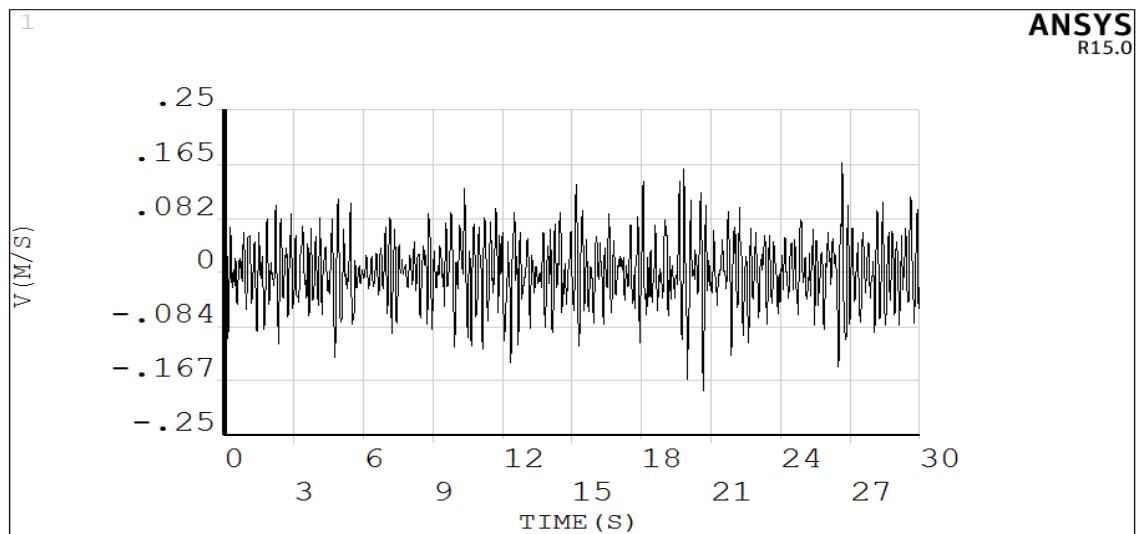


图 4.28 有控制时 4 号模拟点速度响应时程

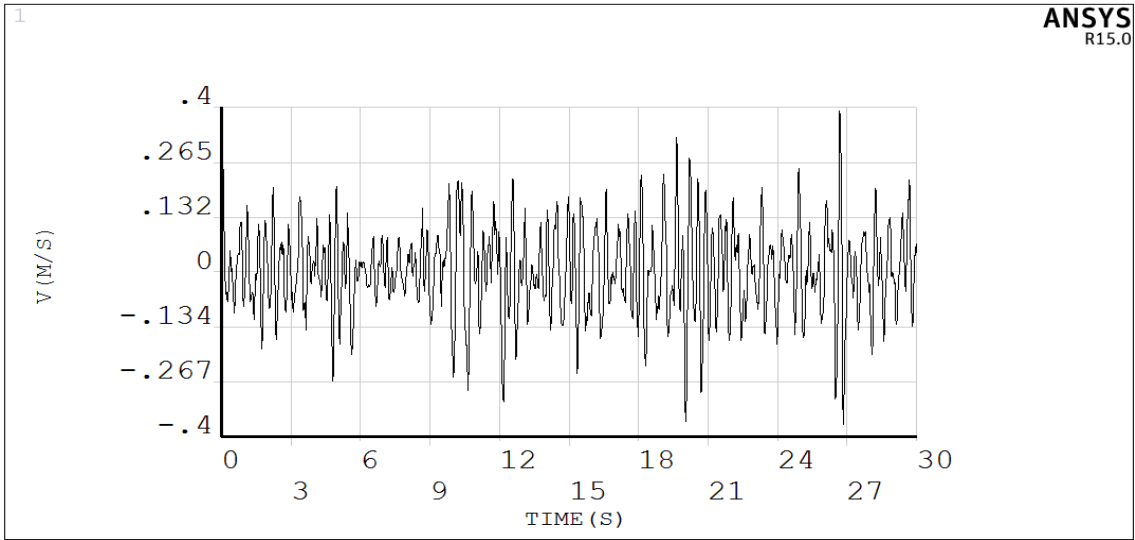


图 4.29 无控制时 5 号模拟点速度响应时程

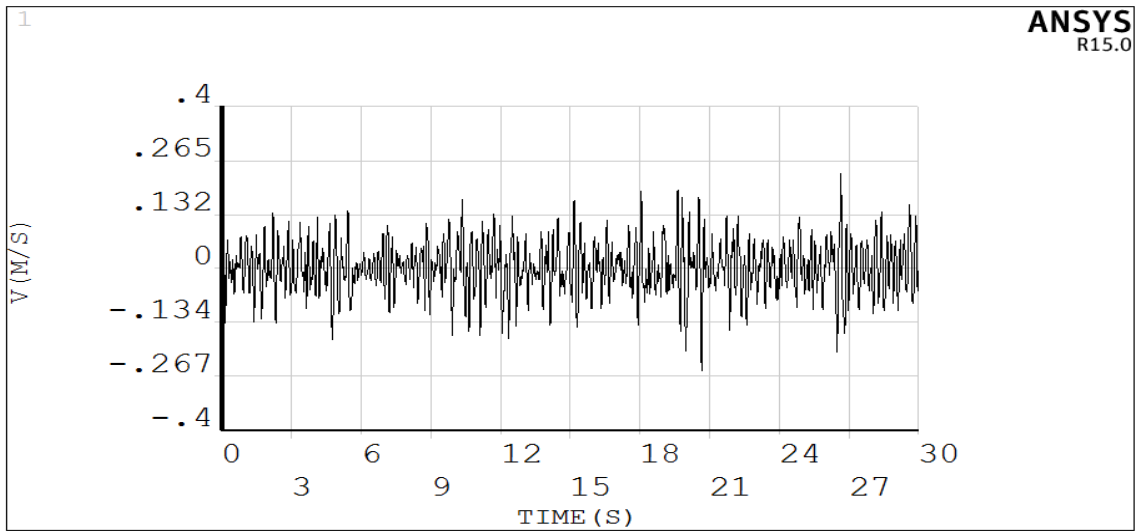


图 4.30 有控制时 5 号模拟点速度响应时程

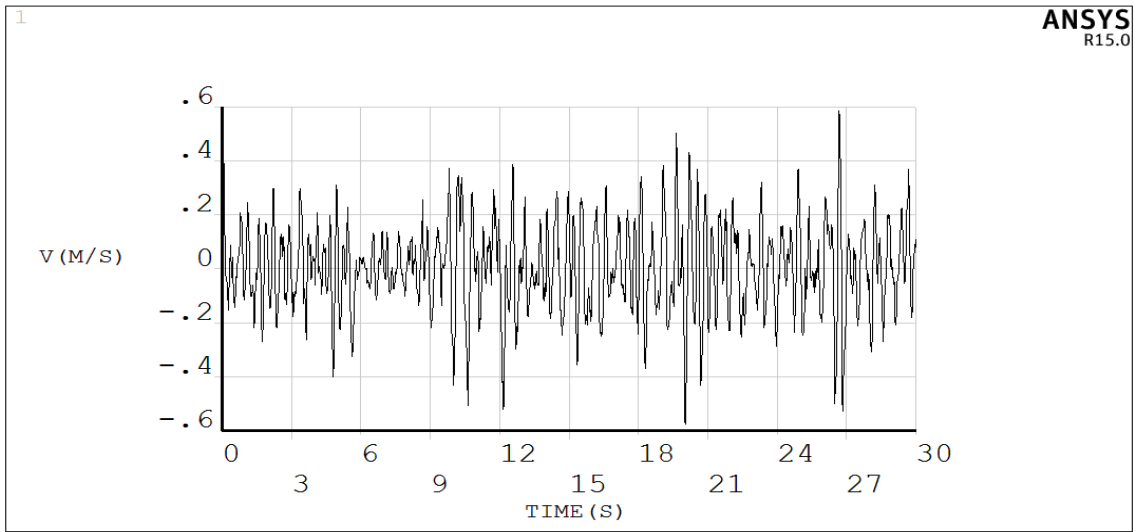


图 4.31 无控制时 6 号模拟点速度响应时程

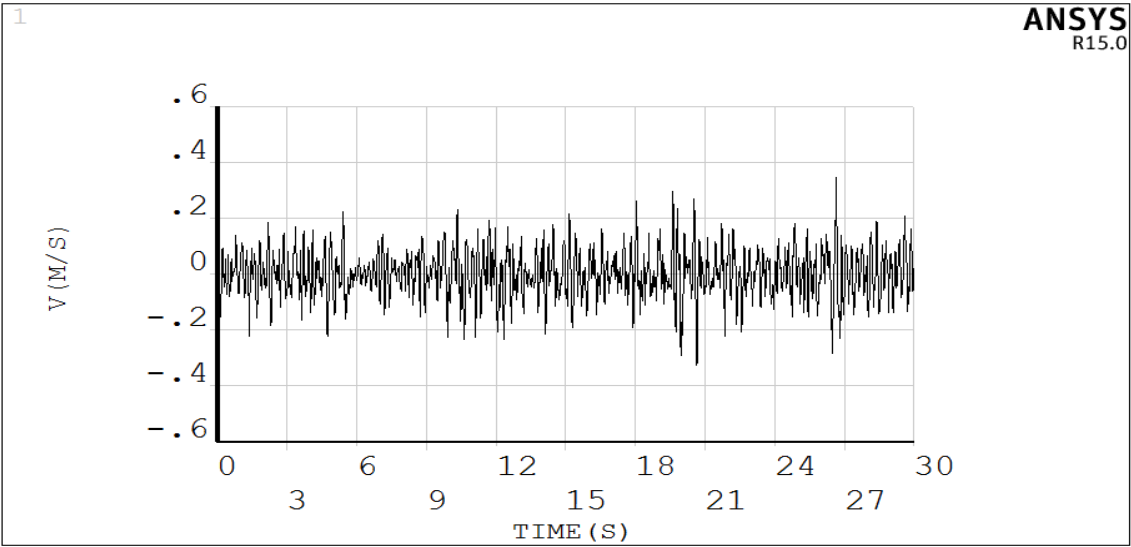


图 4.32 控制时 6 号模拟点速度响应时程

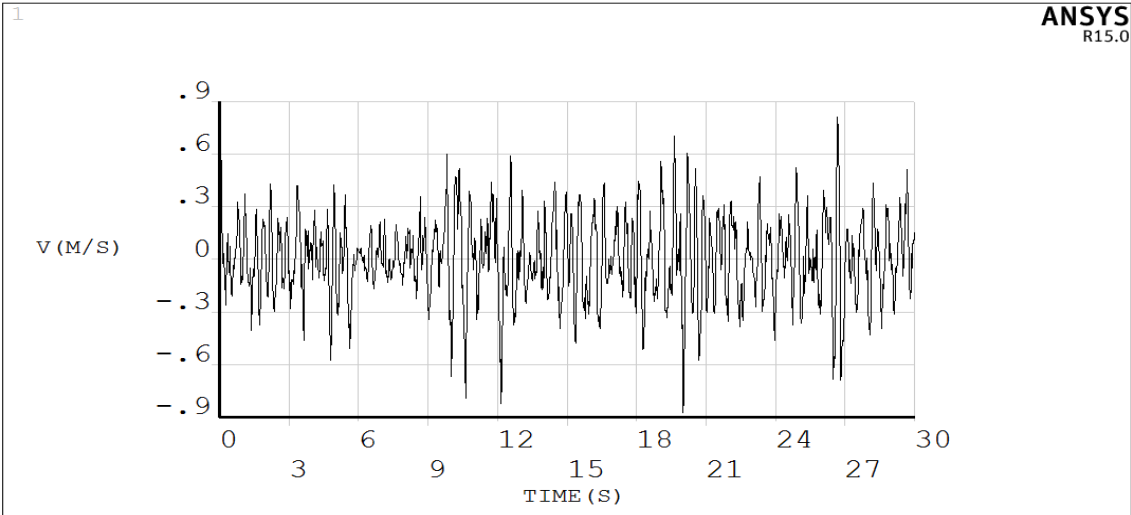


图 4.33 无控制时 7 号模拟点速度响应时程

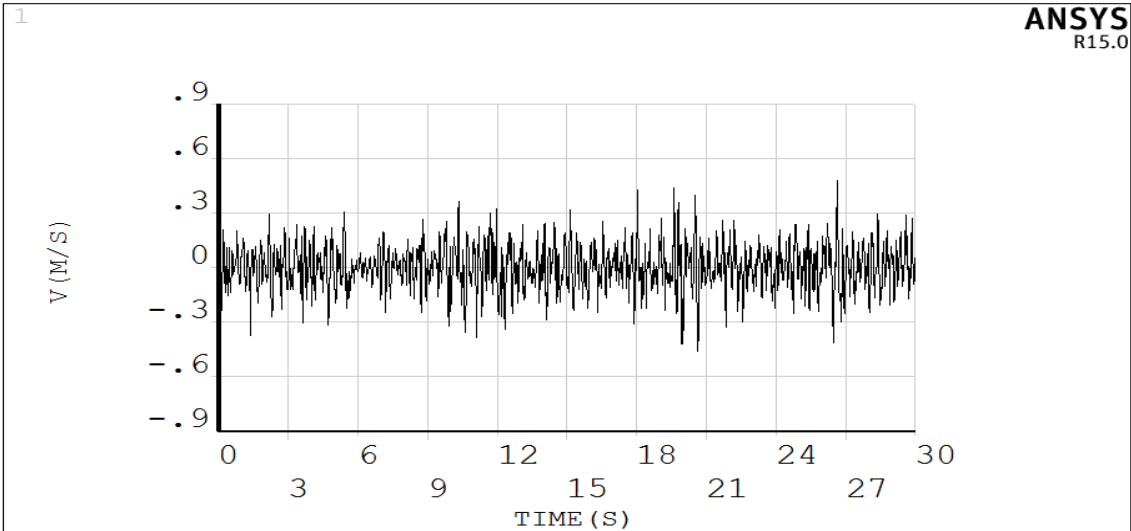


图 4.34 有控制时 7 号模拟点速度响应时程

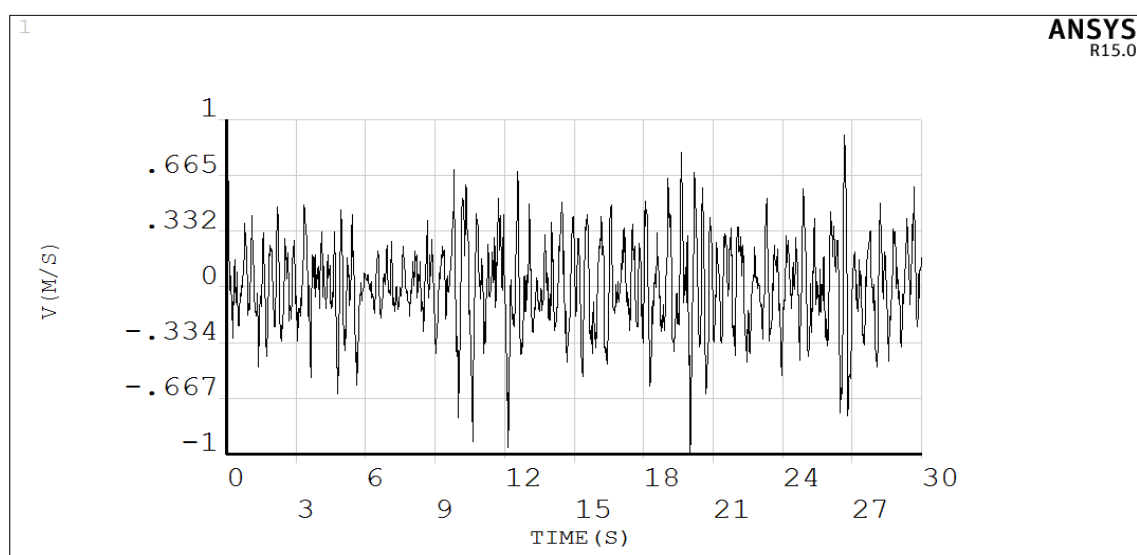


图 4.35 无控制时 8 号模拟点速度响应时程

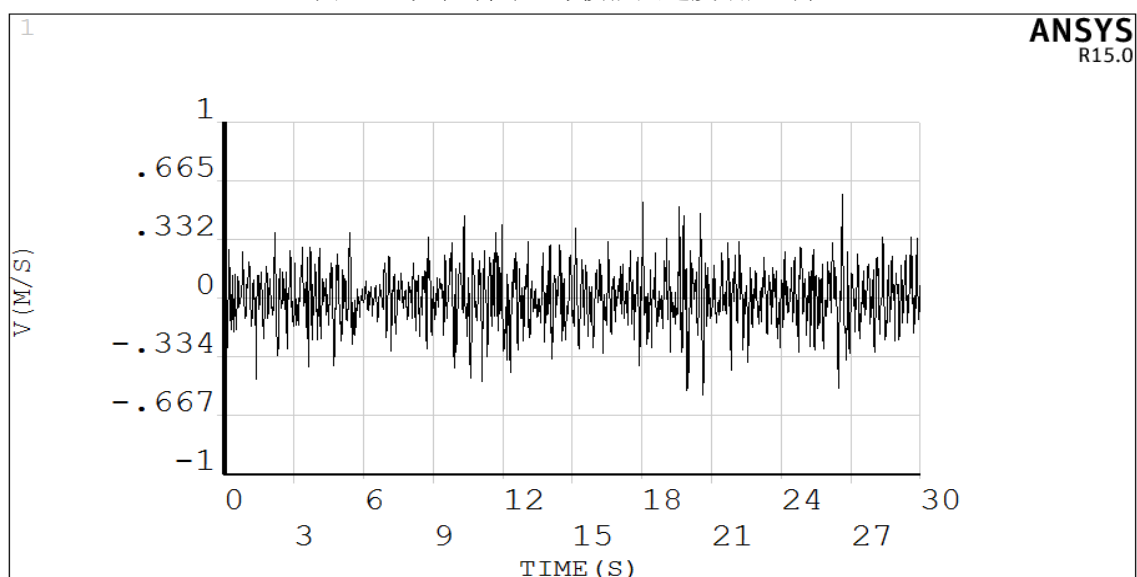


图 4.36 有控制时 8 号模拟点速度响应时程

表 4.1 各模拟点有控和无控作用下位移、速度峰值响应对比

模拟节点层号	位移峰值响应			速度峰值响应		
	未控制时 响应/m	有控制时 响应/m	减少 /%	未控制时 响应/(m/s)	有控制时 响应/(m/s)	减少 /%
1	0.0012	0.0011	8.33	0.0100	0.0093	7.00
2	0.0105	0.0076	27.62	0.0723	0.0636	12.03
3	0.0240	0.0158	34.17	0.1512	0.1286	14.95
4	0.0406	0.0241	40.64	0.2362	0.1827	22.65
5	0.0746	0.0359	51.88	0.3907	0.2541	34.96
6	0.1230	0.0509	58.62	0.5854	0.3539	39.55
7	0.1815	0.0729	59.83	0.8732	0.5117	41.40
8	0.2065	0.0897	56.56	1.0023	0.6029	39.85

通过以上对输电塔结构在控制和无控制作用下的速度、位移响应对比图以及表 4.1 各模拟点的峰值响应数据对比, 可知:

(1) 输电塔随着塔架高度逐渐增加, 对风荷载的作用变得越来越敏感, 所产生的结构响应也越来越激烈。

(2) 施加控制作用后, 各模拟点的位移和速度均得到了有效的控制。从控制前后峰值响应数据对比可以看出, 输电塔结构的速度和位移响应控制效果最大时能减少到约 40% 和 60%。可见采用 ANSYS 和 MATLAB 软件并行计算的方法, 对输电塔结构的风振控制是很有效的。

(3) 通过对所列出的各个模拟点的位移和速度有控、无控状态图对比可以发现, 位移响应的控制效果比速度响应控制效果更明显。通过对表 4.1 各个模拟点在施加控制作用前后位移和速度的峰值对比分析可以发现, 位移的控制效果比速度控制效果一般要高出 15% 左右。

(4) 对表 4.1 各个点的控制效果单独分析观察可以发现, 采用并行计算的方法对输电塔结构的控制作用由下往上是逐渐增加的。从表中数据可以看出以 4 号模拟节点为分界, 再往上结构位移和速度的控制作用是明显变大的。输电塔结构下部的位移和速度响应较小, 上部的位移和速度响应较大, 而此时控制作用在上部响应比较强烈的位置产生的作用也较强, 刚好针对输电塔结构的响应变化规律而变化, 这种变化对于输电塔这种高耸结构是非常有利的, 可见采用这种方法对输电塔结构实现风振响应控制是适用的。

4.5 本章小结

(1) 本章首先介绍了现代结构控制理论, 并介绍了现代控制理论中的基本概念: 状态, 状态向量, 状态空间以及状态方程等。在此基础上推导了状态空间中结构控制系统的状态方程表达式。

(2) 阐述了结构主动控制的组成, 减振机理以及本章应用的线性二次型经典主动控制 LQR 算法的基本原理, 并介绍了 LQR 算法在 MATLAB 程序中编程实现的步骤。

(3) 通过对采用 MATLAB 语言编程实现主动控制模拟的分析, 提出了采用 ANSYS 计算分析和 MATLAB 应用控制算法联合, 共同实现输电塔结构的风振响应控制的思想, 然后采用 APDL 和 MATLAB 语言对两款软件编程, 进行二次开发, 实现这种协同分析并行计算的控制方法。

(4) 采用 MATLAB 软件和 ANSYS 软件并行计算, 使用 LQR 控制算法, 对布置 GMM 作动器的输电塔结构风振响应主动控制, 并把在 ANSYS 中对各模拟点实时分析产生的输电塔结构的位移和速度状态信息以图形的形式展现出来, 并提取各模拟点的峰值响应进行对比, 经过观察和分析表明这种方法对输电塔结构风振响应有很好的控制效果, 适合在实际的输电塔结构的风振响应控制中推广使用。

5 结论与展望

5.1 本文的主要工作与结论

社会建设和工业生产迅速发展，社会和人民的生活对电力依赖性越来越强。输电塔架作为作为输送电能的重要载体，保证其安全稳定运行具有重要意义。输电塔架属于高柔性的高耸结构，这样的特点导致其很容易在风荷载作用下发生破坏，因此很有必要对其在风荷载作用下的振动响应进行控制。本文采用 ANSYS 和 MATLAB 软件联合应用，对两款软件进行二次开发编程，并引入状态观测器 FLAG 文件对软件运行顺序进行控制，采用 LQR 线性二次型最优控制算法对输电塔架在风荷载作用下的振动做出有效控制。

主要研究工作和结论如下：

介绍了风荷载的基本特性，针对平均风特性和脉动风特性分别展开进行介绍，包括指数律和对数律风剖面，脉动风速谱，脉动风的空间相关性，湍流强度等。

对风荷载的模拟方法进行了介绍，包括线性滤波法和谐波叠加法，并指出在模拟中需要注意的关键点部分。根据线性滤波法的基本原理和模拟方法，利用 MATLAB 软件编写程序，模拟了输电塔结构的脉动风速时程，并利用风速风压以及风荷载的转换关系，把模拟出的风速时程转化为风荷载。

对有限元结构分析以及有限元建模的流程进行介绍，采用 ANSYS 15.0 中的 BEAM4 梁单元，建立风振响应分析要用的自立式输电塔有限元模型。

介绍 LQR 线性二次型最优控制算法，对 LQR 主动控制算法的计算原理进行说明，在此基础上，提出联合应用 MATLAB 和 ANSYS 软件对高耸结构实现主动控制。

应用 ANSYS 和 MATLAB 软件联合计算的方法，采用 LQR 控制算法对风荷载作用下的输电塔结构进行主动控制数值模拟计算。分析结果表明，采用这种联合计算的策略对输电塔结构进行模拟可以实现很好的控制效果，对结构的位移和速度响应都得到了很好的控制，其中结构的位移和速度控制效果最高可达到近 60% 和 40%，模拟研究表明这种控制策略对输电塔结构风振作用响应是适用的，建议在以后的模拟研究中采用这种控制方式对结构的振动进行控制。

5.2 研究展望

通过上面的总结，本文联合 ANSYS 和 MATLAB 软件对风荷载作用下的输电塔结构振动进行主动控制模拟分析，得出一些成果。这种针对复杂高耸建筑的控制方法和计算成果可以为以后的研究人员的继续开发和应用提供一些参考。但是由于采用这种方法实现输电塔风荷载响应控制是属于一种交叉学科，所涉及的内容和理论知识太多，本人亦是初次尝试以及个人能力有限，因此，其中定有不足的地方，需要作出进一步的研究：

（1）实际的输电塔属于输电塔—线体系共同工作的，风荷载作用下电线也会对输电塔产生影响，这种因素在以后的模拟计算中应该加以考虑。

（2）采用主动控制 LQR 控制算法时，权矩阵 Q 和 R 的大小，对结构的控制效果很重要，现在一般都是根据经验取值，这显然是不太合适的，应针对具体结构对权矩阵的取值进行优化选择。

（3）作动器的布置位置对结构的控制效果会有很大影响。应该把作动器布置在不同的位置进行对比分析研究，确定在实际应用中最优的布置位置。

（4）针对这种通过并行计算对结构进行控制的方式，关于这方面的研究还是很少的，为了验证和推广这种控制方法，需要增加实验数据的对比，来检验这种方式的正确性以及发现其中需要改进的地方。

（5）本文仅是应用了 LQR 主动控制算法实现并行计算，以后的研究中可以把别的控制方式，如模糊控制，被动控制以及混合控制等也采用这种并行计算的方式在相应结构中实现。

致谢

值此论文完成之际，向所有关心帮助过我的老师和朋友表示由衷的感谢！

首先衷心感谢我的导师朱军强老师！本文是在朱老师的悉心指导下完成的，从论文的选题、撰写、修改、到现在的终稿，这其中无不凝聚着朱老师的心血。在整个研究生时期，导师的严谨治学态度、渊博的知识、无私的奉献精神给我留下了深刻的印象，让我意识到细节的重要性，认识到做事要尽量追求完美。

朱老师非常注重营造认真严肃的科研讨论氛围，几乎每周都会组织我们开会，并汇报近期研究动态。水滴石穿，正是这种良好的学术探讨氛围，保证了我的学位论文顺利的完成。在学位即将完成之际，学生高铭尚发自肺腑的向朱老师表达最真挚的敬意和最衷心的感谢！

衷心感谢同窗好友李明哲在论文完成期间给予我的指导和帮助，还有同窗好友黄铭其、徐妹以及师弟李嘉琪、陆小龙、吴守坤、曹智、刘晓龙、朱海海等在后期论文修改中提出的宝贵意见和建议，谢谢你们！

感谢 2207 宿舍的兄弟史国栋、邓辉阳和继续深造的杨铄博士以及研究生阶段的其他好友，怀念我们一起玩耍、上课、生活的日子，感谢你们让我三年的研究生生活变得更加精彩，让我感觉这三年求学生活过得更有意义。

特别感谢我的父母和家人，谢谢你们在我近二十年的求学生涯中所给予的鼎力支持和默默关心，感谢你们给我的无私的爱以及精神上的鼓励和物质上的帮助。希望我学业的顺利完成能够带给你们无限的自豪和快乐。

最后，向在百忙中审阅本文的老师表示衷心的感谢！

高铭尚

二零一六年六月

参考文献

- [1] 李秀金. 基于 OpenSees 的输电塔架结构抗震性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [2] 曾明正. 高压输电塔及塔线体系的静动力响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [3] 张艳艳. 滑坡灾害下输电塔易损性评估模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 郭勇. 大跨越输电塔线体系的风振响应振动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 朱超伟. 劲风区超高层建筑动力响应的数值试验研究[J]. 科技创新导报, 2013(5):26-28.
- [6] 郭炜. 高层建筑顺风向风荷载风致响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [7] Davenport.A. G.The application of statistical concept to the wind loading of structures. [J]. Proc.ICE,1961,19:449-472
- [8] Davenport A G. Gust Loading Factors[J]. Journal of the Structural Division, ASCE.1967,93:11-34.
- [9] Davenport A G. How can we simplify and generalize wind loads?[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1995, 54(94):657-669.
- [10] 陈波. 大跨屋盖结构等效静风荷载精细化理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 朱奎胜. 基于神经网络的结构风荷载时程模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [12] Iannuzzi A, Spinelli P. Artificial Wind Generation and Structural Response[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(12):2382-2398.
- [13] 王之宏.风荷载的模拟研究[J].建筑结构报, 1994, 15(1): 44-52.
- [14] 张龙. 输电塔线体系动力特性分析及建模研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2009.
- [15] 傅鹏程, 邓洪洲, 吴静. 输电塔结构动力特性研究[J]. 特种结构, 2005, 22(1): 47-49
- [16] 邓洪洲, 张永飞, 陈强, 吴昀. 输电塔风振响应研究[J]. 特种结构, 2008, 25(2): 9-13.
- [17] 王亮. 输电塔结构风致倒塔分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [18] 王骞. 风荷载下大跨越输电塔-线体系振动控制分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.

- [19] 秦佳俊. 输电塔线体系在覆冰和风荷载作用下的动力响应[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [20] 孔伟, 代晓光, 杨振伟. 输电塔的风振控制研究[J]. 吉林电力, 2009, 37(4): 18-21
- [21] 周春良. 钢结构塔架的风振疲劳分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [22] 埃米尔, 希谬. 罗伯特, H, 斯坎伦. 著. 风对结构的作用-风工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992: 351-360.
- [23] 周颖. 双层网壳屋盖的风振响应和风振系数研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [24] 杨晓利. 超限剪力墙高层结构在风荷载作用下的结构响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [25] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 19-39.
- [26] 曾沁敏. 大跨空间结构风荷载数值模拟及风振系数分析[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [27] 周新伟. 某超限剪力墙高层结构的风荷载和风振研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [28] 张成鹏. 桥塔施工阶段风致振动控制分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [29] 马高峰. 防风网支护结构优化计算与风振分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [30] 何艳丽. 空间结构风工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012: 49-63.
- [31] 唐振兴. 高耸通信塔抗风性能分析[D]. 湖南: 湖南大学, 2011.
- [32] 褚国栋, 胡瑞华. 桩基导管架平台在台风及海浪作用下的随机响应分析[J]. 海洋工程, 1989(3):12-23.
- [33] 贾立哲, 段忠东. 考虑风脉动特性的隔震结构抗震抗风性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1):53-57.
- [34] 赵臣, 张小刚, 吕伟平. 具有空间相关性风场的计算机模拟[J]. 空间结构, 1996(2):21-25.
- [35] 王风云. 导管架建模与结构校核系统的分析与研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [36] 郑艺辉. 船舶曲面焊接残余应力与变形有限元分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [37] 张彬. 球面网壳结构的风振主动控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [38] 吴金燕. 输电塔风振响应的主动控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [39] 朱军强, 张彬, 周双科, 李必雄. 基于 LQR 控制算法的输电塔风振控制研究

- [J]. 四川建筑科学研究, 2014, 206(1): 197-199.
- [40] Yao J T P. Concept of Structural Control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7):1567-1574.
- [41] 刘建军. 建筑结构半主动控制系统理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [42] 成聪. 基于 ANSYS 和 MATLAB 的结构主动控制二次开发[J]. 四川建筑, 2015, 35(1): 177-179.
- [43] 于长官. 现代控制理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 36-37.
- [44] 薛江. 斜拱塔无背索斜拉桥施工监控[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [45] 容里. 压电作动器设计及双层球面网壳结构振动主动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [46] 陈定球. 压电梁柱构件的动力方程及其在结构主动振动控制中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [47] 李宏男, 李忠献, 祁皑, 贾影. 结构振动与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 352-358.
- [48] 袁俊. 磁流变阻尼器隔震控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [49] 杨万庆. 大型磁流变液阻尼器的研究及其工程应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [50] Agrawal A K, Yang J N. Optimal Polynomial Control of Seismically Excited Linear Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(8):753-761.
- [51] Mei G, Kareem A, Kantor J C. Real - time model predictive control of structures under earthquakes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(7):995-1019.
- [52] Mei G, Kareem A, Kantor J C. Model Predictive Control of Structures under Earthquakes using Acceleration Feedback[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5):574-585.
- [53] 朱保兵. 拉索振动主动控制理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [54] 杜厚朋. 非线性系统最优扰动抑制控制的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2012.
- [55] 曹伟. 空间网壳结构主动抗震控制理论与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [56] 徐伟. 大型港机结构 CAD/CAE 一体化关键技术研究及实现[D]. 上海: 上海

海事大学, 2005.

- [57] 张涛等. ANSYS APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 213: 6-132.
- [58] 张新宇, 陈忠基, 吴晓元,等. 球磨机静压轴承油膜有限元分析系统的研制[J]. 矿山机械, 2011, 39(2):93-96.
- [59] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 61-87.
- [60] 胡晓雷. 弦支穹顶结构与网壳结构稳定性和抗震性能的对比分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [61] 董杰. 门式起重机结构动态仿真与动力学分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [62] 苗璐璐. 空间网壳结构主动控制理论与数值模拟分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.