工学硕士学位论文

考虑作动器特性的实时子结构试验等效力控制方法

REAL-TIME SUBSTRUCTURE TESTING WITH EQUIVALENT FORCE CONTROL METHOD CONSIDERING CHARACTERISTICS OF ACTUATOR

丁勇

哈尔滨工业大学

2008 年 6 月

国内图书分类号：TU352.1
国际图书分类号：624

工学硕士学位论文

考虑作动器特性的实时子结构试验等效力控制方法

硕士研究生：丁 勇
导　　师：吴 斌 教授
申请学位：工学硕士
学科、专业：结构工程
所在单位：土木工程学院
答辩日期：2008 年 6 月
授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index：TU352.1
U.D.C.:624

Dissertation for the Master Degree in Engineering

REAL-TIME SUBSTRUCTURE TESTING WITH EQUIVALENT FORCE CONTROL METHOD CONSIDERING CHARACTERISTICS OF ACTUATOR

Candidate： Ding Yong
Supervisor： Prof. Wu Bin
Academic Degree Applied for： Master of Engineering
Speciality： Structural Engineering
Affiliation： School of Civil Engineering
Date of Defence： June, 2008
Degree-Conferring-Institution： Harbin Institute of Technology

摘要

实时子结构试验方法是将数值子结构计算与试验子结构实时加载试验相结合的联机试验方法。与传统的结构抗震试验相比，实时子结构试验对加载设备和积分算法都有更高的要求。这就需要对实时子结构试验的可行性进行判断，并对试验结果进行估计。准确的实时子结构试验的数值仿真模型是对试验预估的一个重要手段。

本文基于 Colorado University 结构实验室的液压伺服作动器数值模型建立了实时子结构试验等效力控制方法的 Simulink 数值仿真模型，并针对具有位移相关型试件和速度相关型试件的结构进行了数值仿真分析。主要结论如下：

首先，建立了采用等效力控制方法实时子结构试验 Simulink 数值仿真模型。此模型考虑了电液伺服作动器的高阶特性、非线性特性及试验子结构动力特性对试验的影响。

其次，采用 PID 等效力控制器，应用非线性电液伺服作动器模型进行试验子结构为位移相关型试件的实时子结构试验进行数值仿真，仿真表明，等效力 P 控制得到的位移响应存在较大抖动，而等效力 PI 控制器能够解决位移抖动问题。当试验子结构为单自由度位移相关型试件时，设计了等效力 LQG 控制器，研究表明，选择合适的权矩阵可以使仿真结果与精确解吻合较好。

最后，对试验子结构为速度相关型试件的实时子结构试验进行了数值仿真分析，研究了 PID 等效力控制器比例、微分、积分增益对速度反应的影响。研究表明， PI 控制器可以对等效力控制系统进行很好的控制。针对试验子结构为速度相关型试件的实时子结构试验设计了等效力 LQG 控制器，以单自由度结构为例进行数值仿真，权矩阵选取合适时，仿真结果与精确解吻合较好。

关键词 实时子结构试验；液压伺服作动器；等效力控制方法；PID 控制器；LQG 控制器

Abstract

Real-time substructure testing (RSTing) is an experimental testing method that combines the solution of the motion equation of the numerical substructure with real time dynamic loading of the test substructure. Compared with conventional experimental methods, RSTing has more requirements about the testing facilities and step-by-step integration method. It is essential to estimate the feasibility of the RSTing and the corresponding results. An accurate numerical model of the RSTing system is an important tool to simulate the testing.

In this paper, a numerical model of real time substructure equivalent force control (EFC) is developed based on an accurate numerical model of the actuator in Colorado University structural laboratory. Numerical simulations of RSTing, in which the test structure is displacement-dependent and velocity-dependant specimen, are studied. The contents are described briefly as follows:

First, the numerical model of EFC system is developed applying the accurate numerical model of the servo-hydraulic actuator. This numerical model can describe characteristics of the physical test system, which is of high order, nonlinear and relevant to the test specimen.

Second, when the equivalent force controller is PID controller and the substructure is displacement-dependent specimen the numerical simulation of RSTing is studied applying the nonlinear EFC system. The results demonstrate that the P controller of the EFC system will make the displacement response become oscillating and the PI controller can solve this problem. The LQG control method of the EFC system for displacement-dependant specimen is presented. The numerical simulation of LQG control of the EFC system is investigated. The results of numerical simulation show that LQG control method can control the equivalent force system effectively with the appropriate weight matrix.

Finally, the influence of proportional, derivative, and integration gains in PID equivalent force controller on the velocity response of velocity-dependent specimen in RSTing is investigated. It is shown from the numerical simulation results that the EFC system works well with PI controller. Then, a LQG EFC

controller is proposed for the RST of structures with velocity-dependent specimen. The simulation results of an SDOF structure matches the analytical results very well if the weight matrix is appropriately designed.

Keywords real-time substructure testing; servo-hydraulic actuator; equivalent force control method; PID controller; LQG controller

目录

摘要 I
Abstract II

第 1 章 绪论 1
1.1 课题背景 1
1.2 国内外研究现状 2
1.2.1 拟动力试验方法 2
1.2.2 实时子结构试验方法 3
1.2.3 实时子结构试验等效力控制方法 7
1.3 本文主要研究内容 8
第 2 章 等效力控制系统数值仿真模型 10
2.1 引言 10
2.2 实时子结构试验等效力控制方法原理 10
2.3 物理试验系统 12
2.4 非线性等效力控制系统的线性化 16
2.5 等效力控制系统的LQG控制器设计 19
2.6 物理试验系统二阶模型与非线性模型的比较 22
2.7 本章小结 28
第 3 章 位移相关型试件的等效力控制方法 29
3.1 引言 29
3.2 位移相关型子结构试验的PID等效力控制系统 29
3.2.1 PID等效力控制系统的数值仿真分析 29
3.2.2 实时子结构试验数值仿真分析 36
3.3 位移相关型子结构试验的LQG等效力控制系统 44
3.3.1 等效力LQG控制器设计 44
3.3.2 LQG等效力控制系统仿真 45
3.3.3 实时子结构试验数值仿真分析 46
3.4 本章小结 51
第 4 章 速度相关型试件的等效力控制方法 52
4.1 引言 52

4.2 速度相关型子结构试验的PID等效力控制系统.....52
4.2.1 PID等效力控制系统数值仿真分析.....52
4.2.2 实时子结构试验数值仿真分析.....56
4.3 等效力的状态反馈控制.....61
4.3.1 等效力LQG控制器设计.....61
4.3.2 LQG等效力控制系统数值仿真分析.....62
4.3.3 实时子结构试验数值仿真分析.....64
4.4 本章小结.....67
结论.....68
参考文献.....69
攻读学位期间发表的学术论文.....74
哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明.....75
哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书.....75
哈尔滨工业大学硕士学位涉密论文管理.....75
致谢.....76

第1章 绪论

1.1 课题背景

地震给人类带来巨大的经济财产损失和人员伤亡。强地震发生在人口稠密处时损失惨重。我国是一个多地震的国家，也是地震灾害损失最为严重的国家。1556年陕西关中地震遇难者中有名可查的即达83万；1920年宁夏的海原地震，死亡人数达20余万；1976年河北唐山地震震级近8级，死亡人数达24万，强震区内的房屋、工业厂房与设备城市建设、交通运输、水电设备等受到极其严重破坏；2008年5月12日14时28分，四川省发生8级强烈地震，震中位于阿坝州汶川县，全国大半地区有明显震感，地震造成了严重的生命和财产损失，到目前为止死亡人数近七万，失踪人数近两万。在近几十年，随着经济发展和科技进步，人们的生活水平有了显著的提高，地震造成的损失更加突出。人们逐渐从地震灾害中认识到提高结构抗震减振性能的必要性[1,2]。

随着设计理论、建筑材料、工业技术的发展，结构抗震性能得以不断提高。结构试验技术是检验结构抗震理论的重要手段，与结构抗震理论相互促进，共同发展。没有抗震试验的验证，抗震理论难以应用于实际工程；若抗震理论没有得到发展，那么抗震试验作为抗震理论的检验手段也会停滞不前。

传统的结构抗震试验可分为拟静力试验、拟动力试验和振动台试验。拟静力试验由于技术简单、稳定而应用最为广泛，但是其缺点在于不能考虑地震作用对结构的影响。拟动力试验的局限性在于不能完全反映速度相关型结构的性能，无法考察试验子结构阻尼力在地震作用下对结构响应的影响。振动台试验最能真实地反映地震对结构的影响，但是由于振动台承载能力的限制，往往只能进行缩尺结构试验。为了解决拟动力试验所遇到的困难，Nakashima等人于 1992 年提出实时子结构试验方法，以准确反映速度相关型试件的性能[3]。

1.2 国内外研究现状

实时子结构试验方法是由拟动力试验方法发展而来的，实时子结构试验方法也称实时拟动力试验方法，实时子结构试验方法和拟动力试验方法都是结构计算与结构试验相结合的试验方法。

1.2.1 拟动力试验方法

拟动力试验方法又称联机试验方法，由日本学者M. Hakuno等人 1969 年首次提出的[4,5]。拟动力试验方法兼备拟静力试验和结构理论分析和计算的优点，可以模拟大型复杂结构的地震反应。拟动力试验方法是将计算机对结构的计算与加载作动器联机求解结构动力方程的方法，目的是为了能够真实地模拟地震对结构的作用。

结构拟动力试验方法与数值方法进行的分析过程的本质区别在于拟动力试验将计算机的结构计算与物理试验相结合，计算机在进行结构计算的过程中需要从试验结构中测得的回复力信息，而数值积分方法的信息是从数值模型中获得的[6~9]。

尽管拟动力试验的加载过程是慢速的，且与拟静力试验的加载设备相似，但拟动力试验与拟静力试验有本质区别。拟动力试验的加载目标需要经过前一步或几步的测量结果和计算结果通过递推公式得到，递推公式基于离散化的运动方程求得。这与拟静力试验不同，拟静力试验的加载目标是加载前已经确定的。

拟动力试验的试验对象和积分算法的发展是由简单到复杂的。大型复杂结构逐渐增多，拟动力试验的试验对象逐步大型化、复杂化，然而，受制于拟动力试验设备的加载能力，大型复杂结构的试验无法进行。子结构试验技术在拟动力试验中的应用使得结构的规模得到充分考虑，并且能够有重点的选择结构进行研究。传统拟动力试验的积分算法主要是采用的是显式积分算法。显式积分方法是有条件稳定的，对刚度大自由度多的结构有很大局限性，对积分步长有严格限制。隐式积分算法的数值稳定性较好，但是需要迭代求解。台湾学者Chang于 1999 年提出Chang方法，此方法适用于拟动力试验，且为显式方法[10]。

拟动力试验方法自提出以来得到了广泛的应用。国外很多学者对不同试验对象进行了拟动力试验研究。文献[11]对一六跨桥梁结构进行了拟动力试

验，取其中的两跨为非线性的试验子结构，其余为数值子结构，对桥的大比例尺的拟动力试验首次考虑了子结构的非线性。Yokouchi等人[12]对一栋安装摩擦阻尼器的三层教学楼进行了足尺的拟动力试验，结果发现安装阻尼器起到了很好的减震效果，同时试验的结果与设计分析的结果吻合的很好。Tsai对设有钢管填充混凝土约束防屈曲支撑的三层框架进行了足尺拟动力试验研究，发现防屈曲支撑在结构中的累积塑性变形能力不如构件试验中的累积塑性变形能力[13]。

随着网络技术的发展，国内外进行了一系列的远程协同试验的研究。包括美国的NEES(Network for Earthquake Engineering Simulation)[14]、日本的并行拟动力测试系统(The Parallel Pseudo-dynamic Testing System with the Internet)[15]、韩国的网络拟动力试验系统(On-line Pseudo-dynamic Network Testing)和中国台湾的ISEE系统(Internet-based Simulation fot Earthquake Engineering)。我国大陆一些学者也在进行远程协同试验的研究，由湖南大学肖岩、易伟建教授负责，联合清华大学、哈尔滨工业大学及美国南加州大学，正在承担国家自然科学基金重点项目，进行网络结构实验室(NetSLab)的研究[16]。目前，快速混合试验的网络平台技术也是国家自然科学基金重大研究计划中大型建筑及桥梁结构动力损伤过程的实时混合试验方法与技术研究的一部分。大型建筑及桥梁结构动力损伤过程的实时混合试验方法与技术由哈尔滨工业大学吴斌教授负责，湖南大学、中国建筑科学研究院参加进行研究[17]。

传统拟动力试验的加载速度慢，无法考虑加载速率对试验对象的影响。近年来，由于对结构耗能减振的需要不断提高，很多速度相关型、加速度相关型构件应用到结构中去，速度相关型、加速度相关型结构的特性在传统的拟动力试验中无法体现。

1.2.2 实时子结构试验方法

1.2.2.1 实时子结构试验的提出与基本原理

正是由于拟动力试验加载速度慢，对加载速度敏感的结构构件的试验不能得到令人满意的试验结果，有人提出了快速拟动力试验，然而，方法本身和实际情况仍然有很大差别，加载速度对加载装置提出了更高的要求，很多情况下难以得到满足，无法真实反映试件的特性。为了解决拟动力试验所遇到的困难，日本学者Nakashima等人于 1992 年提出“实时拟动力试验方

法”，后来称为“实时子结构试验方法”[3]。

试验把待研究的结构对象分为两部分，对力学模型十分复杂且无有效手段进行数值模拟的部分进行原型试验，称为试验子结构；对其余已经有合理模型的部分进行数值计算，称为数值子结构。试验子结构与数值子结构边界条件按实际边界和交接面上的约束情况进行考虑。在每一个积分步长内，计算机求解微分方程算得数值子结构在某种动力荷载（如地震动）和试验子结构反力共同作用下的动力反应，并把数值子结构和试验子结构交界面上的位移、速度、加速度传递给控制器，由作动器加载试验子结构以实现交界面上的位移、速度、加速度。传感器从试验子结构上测得的回复力，并传递给计算机进行下一步加载计算。重复以上过程直到试验结束。如果这一过程在每个积分步长内实时地完成，那么可以得到结构在动荷载作用下真实的动力反应。

已有的实时子结构试验从加载设备和试验设备上可以分为两大类，一类是作动器加载子结构试验，使用作动器将目标位移直接加载到试验子结构上[18~20]，原理图如图 1-1所示；另一种是振动台实时子结构试验，这种试验将试验子结构放置于振动台上进行试验[21~23]原理图如图 1-2所示。

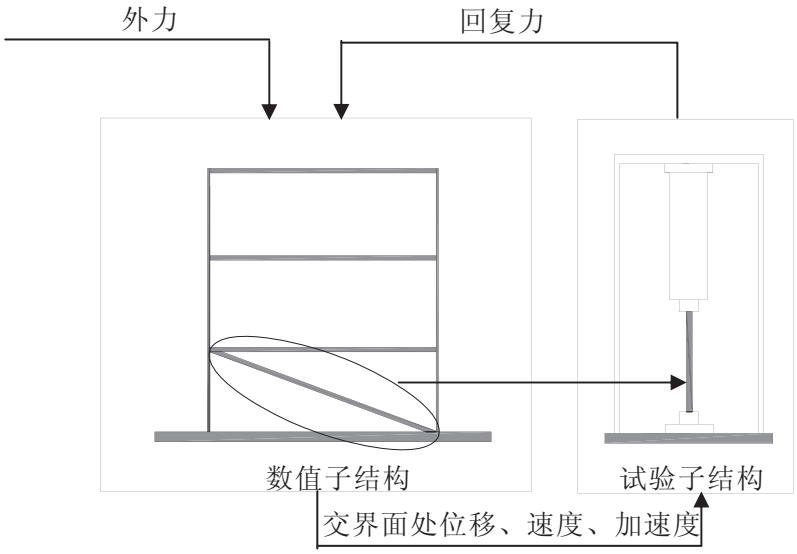


图1-1 作动器子结构试验原理图

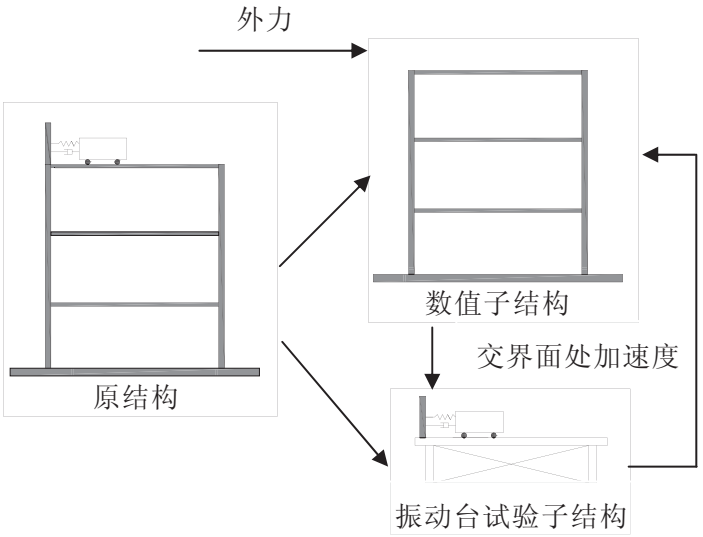


图1-2 振动台子结构试验原理图

1.2.2.2 实时子结构试验的加载控制

实时子结构试验的加载控制可以分为位移控制加载、力控制加载。位移加载控制是在加载过程中以位移作为控制值，加载目标是使试验结构达到指定的位移。

在位移控制控制加载的实时子结构试验中，位移的实现需要反馈控制来完成。计算机在这个过程中通过数值积分方法求解运动方程求得目标位移。目标位移计算出来之后，作动器往往不能通过一次加载就实现这个目标位移，需要通过位移的反馈控制逼近目标位移，这个过程需要在一个积分步长内实现。

PID控制作为经典控制方法原理简单，易于实现，控制效果好，因此在实时子结构位移控制加载过程中得到广泛使用。Williams[24,25]、Shing和June[26,27]等进行的实时子结构试验的电液伺服加载设备均采用PID控制。在土木工程试验中，在对试件加载前设置PID参数，使其效果达到最优。当试验对象在加载过程中进入塑性时，PID最优参数将发生变化，如果试验加载设备中的PID参数保持不变，那么试验对象性能的变化可能会影响试验结果[27]。

滑动模态控制方法是变结构系统中比较成熟的一种方法，鲁棒性较强，当系统参数和外扰动表现出不确定性时仍然能够保证较好的控制效果。吴斌

等[28,29]学者提出了实时子结构试验系统的滑动模态控制，并成功地应用于实时子结构位移控制加载的线性试验系统。可以将一个反馈控制体系得响应状态用相平面表示，横轴表示系统响应的位移，竖轴表示系统响应的速度。外界干扰下，系统地响应时程在相平面中形成一条轨迹曲线，如果轨迹曲线趋向于无穷大，那么系统是不稳定的，当轨迹曲线趋向于原点，那么系统是稳定的。滑动模态控制就是要将系统响应的任意初始状态引入相平面中稳定的滑动面，而后设计控制器，是系统响应在滑动面内稳定的趋向于原点，这样达到了控制的目的[29]。文献[28]将电液伺服加载系统线性化转化为传递函数，并将传递函数转化为状态空间模型，利用内模设计方法把系统控制的跟踪问题转化为信号调节问题，从而成功地把滑动模态控制方法应用于实时子结构试验系统中。然而，滑动模态控制是否适用于非线性电液伺服加载系统仍然值得进一步研究。

自适应控制方法在实时子结构位移控制加载中取得了一些成果。自适应控制适于不确定的试验对象或事先难以确知的对象，有辨识对象和在线修改参数的能力。自适应控制较多的依靠计算机技术试验，其系统本身有非线性特性[30]。Wagg和Stoten[31]对最小控制合成法在实时子结构试验中的应用进行了研究，这种方法也是一种自适应的控制方法。邓利霞等研究了模型参考自适应控制系统的设计方法，针对线性试件的实时子结构试验设计了试验加载的模型参考自适应控制系统，仿真结果表明，模型参考自适应控制的控制精度和鲁棒性优于PID控制[32]。

前面介绍的是实时子结构位移控制加载，实时结构抗震试验中力控制加载也有一些应用，有效力试验就是通过力控制加载。有效力试验方法将结构简化为底端刚接的集中质量模型，通过向各个集中质量块施加有效力来模拟结构在地震作用下的响应。在有效力试验加载过程中，如果加载频率与结构振动频率相近，那么有效力很难施加到结构上。Zhao[33]等人采用速度反馈的方法提高实时试验中力控制的精度。在实时结构抗震试验过程中，结构进入屈服阶段后，加载的力不易控制，因此采用力控制的试验方法能否很好进行加载控制有待于进一步研究。

1.2.2.3 实时子结构试验的数值积分方法

实时子结构数值积分方法由拟动力逐步积分算法发展而来[6,24]。传统的拟动力积分方法可以分为显式算法和隐式算法。在拟动力试验中，只需要使结构达到目标位移，而对结构达到目标位移所用时间和结构达到目标位移时的速度、加速度没有要求。若结构的第i+1 步位移可以由第i+1 步以前的已

知量表示，称这种方法为显式方法，否则称为隐式方法。显式方法的优点是可以避免迭代过程、计算速度快，但是一般是有条件稳定。对于多自由度结构，显式积分方法由于稳定界限的限制，积分步长要求很小，每一个积分步长内的位移增量很小，这对电液伺服加载设备的精度提出了更高的要求；隐式算法一般无条件稳定，需要迭代求解[34]。

而在实时子结构试验中，试验子结构的回复力不仅仅和位移相关，还可能和速度、加速度相关，这就需要子结构在指定的时间达到指定的位移、速度和加速度，因此，传统的拟动力试验的显式方法和隐式方法概念发生了变化[35]。对于实时子结构试验，若结构在第i+1 步位移、速度、加速度可以由第i+1 步以前的已知量表示，称这种方法为实时子结构显式方法，否则称为实时子结构隐式方法。中心差分法在拟动力试验中使用是一种显式的算法，回复力与加速度和速度没有关系，而在实时子结构试验中，中心差分法不仅需要第i+1 步的位移，还需要第i+1 步的速度和加速度，因此是一种隐式算法。保海娥等对Chang提出的显式无条件稳定显式算法进行速度计算修正，将其变为实时子结构算法，虽然实时子结构Chang方法有条件稳定，但是稳定性优于实时子结构中心差分法[35~38]。杨现东等[39]对振动台子结构试验的积分方法进行了研究，研究表明，当中心差分法用于考虑试件质量的实时子结构试验中时，实时子结构中心差分法的稳定性比标准中心差分法稳定性差。

文献[40]-[43]对OS法进行了研究，结果表明，实时子结构试验OS法是无条件稳定的显式算法，但是对于非线性系统精度不高。Tada等人改进了OS算法，改进后OS算法对于几何非线性结构较传统的OS法好，但是对于线性结构不如传统的OS法。李进、王焕定等提出了高阶单步实时子结构显式算法，该算法具有无条件稳定、无算法阻尼等特点[44]。

α－方法是拟动力实验中研究最多的隐式方法，最初由Hilber等人在进行结构动力分析中提出[45]。Shing[26,46]等学者对此方法进行了研究，并将其用于实时子结构试验中。

1.2.3 实时子结构试验等效力控制方法

隐式方法虽然无条件稳定，但是需要迭代求解，为了避免迭代，吴斌等学者提出等效力控制方法求解非线性运动方程[47]。

王倩颖等针对试验子结构为阻尼试件的情况，讨论了由等效力命令插值

所导致的积分算法数值特性的改变；利用PD 控制方法设计了等效力控制器，确定了试验的最小微分增益；针对试验子结构为刚度试件和阻尼试件的情况进行了数值模拟；利用被动磁流变阻尼器作为试验子结构对等效力控制方法进行了试验验证[8,47]。在采用等效力控制方法的实时子结构试验中，微分增益取值很小时试验也会失稳，文献[8]认为是由试验子结构的测量反力存在噪声引起的，但是等效力控制器中的微分增益对实时子结构试验中等效力控制系统的影响需要进一步研究。

冯涛等[48]进行了等效力控制的无超调设计，分别针对试验子结构为弹性试件、阻尼试件和非线性弹性体系的情况，利用数值分析的方法检验该控制器的有效性。冯涛、李妍[49]等分别对等效力控制系统参数C_F取值方法进行了讨论。李妍采用等效力控制方法并使用时滞补偿方法进行了防屈曲支撑的实时子结构试验。

许国山等[50]对实时子结构试验的等效力控制方法也进行了研究，并对弹性试件体系进行数值模拟和试验。文献[50]提出，要想全面揭示等效力控制方法的性能，还需要用弹簧试件试验来进一步验证该方法的有效性。文献[50]认为，在某种意义上讲，用这种方法去做小阻尼体系、甚至无阻尼体系试验要比做阻尼试件试验更具有挑战性，因为试验系统很小的时滞都可能使其不稳定。该文献中的结论验证了实时子结构等效力控制方法的有效性和实时子结构试验中的时滞的负阻尼作用。

在以往的实时子结构试验等效力控制方法中，结构的质量往往被忽略，回复力中不考虑惯性力作用。当试验子结构质量及加速度较大时，忽略质量往往是不准确的。王贞等[51]进行了考虑试件质量的实时子结构试验等效力控制方法的稳定性分析，提出了等效力命令二次插值方式。经王贞等数值仿真研究表明，质量比小于 1 时，考虑试件质量的等效力控制法无条件稳定，质量比大于 1 时，该算法不满足零稳定性；数值子结构的阻尼不改变质量比小于 1 时算法的无条件稳定性。

目前进行的实时子结构等效力数值仿真的物理试验部分是基于二阶传递函数模型，是否能够较好的反应真实试验过程值得研究。

1.3 本文主要研究内容

实时子结构等效力控制方法是使用反馈控制的方法而避免了牛顿迭代，在这方面，已经取得了研究成果。但是还有很多值得研究的问题，包括以下

几点：

1. 目前实时子结构试验等效力控制方法的数值仿真分析使用二阶传递函数模型描述物理试验系统，而不是一个能够反映物理试验系统特性的数学模型，因此不能够真实反映加载系统的高阶系统特性、电液伺服加载系统非线性问题、试验子的变化对试验结果的影响和试验子结构的非线性等。

2. 虽然传递函数描述的物理试验系统方便了等效力控制器设计过程，但是基于二阶模型与真实的物理试验系统有很大差别，当前等效力控制器能否直接应用于试验有待于进一步研究。

基于以上问题，本文应用液压伺服系统的非线性数值模型对不同试验子结构的实时子结构试验进行了研究，具体内容主要包括以下几点：

1. 应用等效力控制方法及能够反映电液伺服作动器特性的模型建立实时子结构试验的数值仿真模型。

2. 针对试验子结构为位移相关型试件的实时子结构试验，研究等效力 PID 控制器的比例、微分、积分增益对试验结果的影响，确定位移相关型子结构试验的 PID 等效力控制器参数；设计实时子结构试验等效力 LQG 控制器。

3. 针对试验子结构为速度相关型试件的实时子结构试验，研究等效力 PID 控制器比例、微分、积分增益对试验结果的影响，确定速度相关型子结构试验的 PID 等效力控制器参数；设计实时子结构试验等效力 LQG 控制器。

第2章 等效力控制系统数值仿真模型

2.1 引言

土木工程结构抗震试验的加载设备一般是电液伺服加载设备[52]。电液伺服加载设备的性能会很大程度上影响实时子结构试验结果，在进行试验之前有必要判断试验可行性，对试验结果进行预估，因此，建立能够真实反映试验过程的数值仿真模型进行数值仿真分析是十分必要的。

本节应用 Colorado University 结构实验室的电液伺服加载系统非线性数值模型建立等效力控制系统模型。

2.2 实时子结构试验等效力控制方法原理

实时子结构试验中，整体结构被划分为数值子结构和试验子结构，第 i 个积分步长内运动平衡方程如式(2-1)所示：

$$M_{\mathrm{N}}a_{i+1}+C_{\mathrm{N}}v_{i+1}+R_{\mathrm{N}}(d_{i+1})+R_{\mathrm{E}}(a_{i+1},v_{i+1},d_{i+1})=F_{i+1} \tag{2-1}$$

其中，角标 N 代表数值子结构，角标 E 代表试验子结构。M、C 分别代表质量、阻尼；R 表示回复力；F 为外荷载。

下面以平均加速度法为例介绍等效力控制方法原理，平均加速度方法假设如下[8]：

$$a_{i+1}=\frac{4}{\Delta t^2}(-d_i-\Delta t v_i-\frac{\Delta t^2}{4}a_i+d_{i+1}) \tag{2-2}$$

$$v_{i+1}=-\frac{2}{\Delta t}d_i-v_i+\frac{2}{\Delta t}d_{i+1} \tag{2-3}$$

其中，Δt 为积分时间步长，将式(2-2)和式(2-3)代入带入式(2-1)有：

$$R_{\mathrm{N}}(d_{i+1})+K_{\mathrm{PD}}d_{i+1}+R_{\mathrm{E}}(a_{i+1},v_{i+1},d_{i+1})=F_{\mathrm{EQ},i+1} \tag{2-4}$$

式(2-4)中K_{PD}和$F_{\mathrm{EQ},i+1}$计算方法如下：

$$K_{\mathrm{PD}}=\frac{4M_{\mathrm{N}}}{\Delta t^2}+\frac{2C_{\mathrm{N}}}{\Delta t} \tag{2-5}$$

$$F_{\mathrm{EQ},i+1}=F_{i+1}+M_{\mathrm{N}}a_i+(\frac{4M_{\mathrm{N}}}{\Delta t}+C_{\mathrm{N}})v_i+(\frac{4M_{\mathrm{N}}}{\Delta t^2}+\frac{2C_{\mathrm{N}}}{\Delta t})d_i \quad (i=1,2\cdots) \tag{2-6}$$

式(2-4)可以理解为一个混合体系的平衡方程。方程左边由混合体系的数值子结构静反力 $R_{\mathrm{N}}(d_{i+1})$、拟动力反力 $K_{\mathrm{PD}}d_{i+1}$ 和试验子结构的反力 $R_{\mathrm{E}}(a_{i+1},v_{i+1},d_{i+1})$ 三部分构成。方程右边为 $F_{\mathrm{EQ},i+1}$，可看成加在混合体系上的等效力外力。整个体系响应可以看作是数值子结构、试验子结构和虚拟部分的并联在外力作用下的整体响应。

式(2-2)~(2-6)不包括等效力控制系统的初始状态，等效力初始状态的平衡方程为：

$$R_{\mathrm{N}}(d_0)+K_{\mathrm{PD}}d_0+R_{\mathrm{E}}(a_0,v_0,d_0)=F_{\mathrm{EQ},0} \tag{2-7}$$

实时子结构试验等效力控制方法的原理图如图 2-1所示，物理试验系统包括伺服控制器、伺服阀、作动器和试验子结构[25,28]，具体介绍见 2.3 节。等效力控制系统的外环控制为力的控制，而电液伺服加载的过程为位移控制。等效力响应与等效力命令的偏差经过控制器、力位移转换系数C_{F}后转换为位移命令。本文中的力与位移转换系数的方法选用式(2-8) [8]：

$$C_{\mathrm{F}}=1/(K_{\mathrm{N}}+K_{\mathrm{PD}}+K_{\mathrm{E}}) \tag{2-8}$$

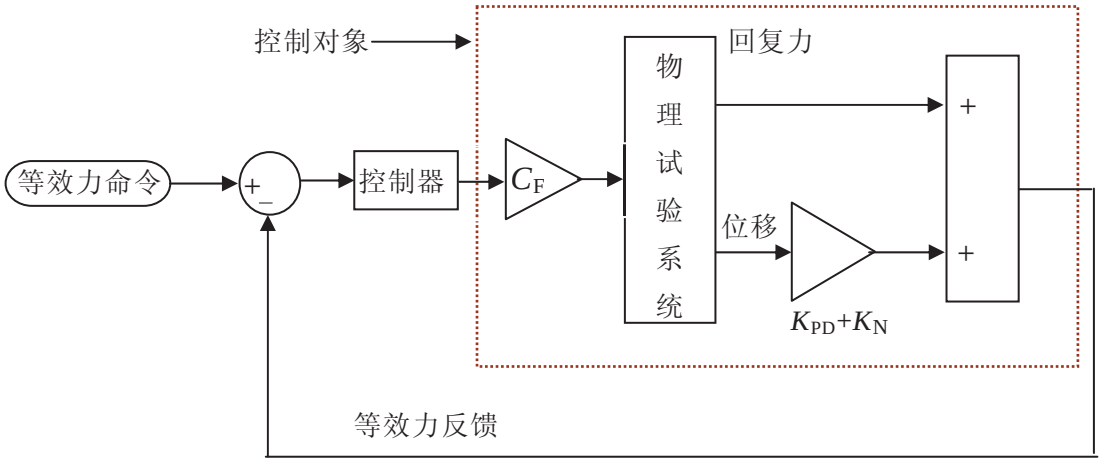


图2-1 实时子结构试验等效力方法原理[8]

当等效力控制器采用PD控制器时，等效力控制系统的框图如图 2-2 所示。采用PD控制器时会存在稳态误差，消除稳态误差的方法有增大开环增益、增加前向通道中积分环节数等[67]。文献[8]在进行等效力控制器设计时是使用增大开环增益的方法消除稳态误差。开环增益取值为$(1+K_{\mathrm{P}})/K_{\mathrm{P}}$。

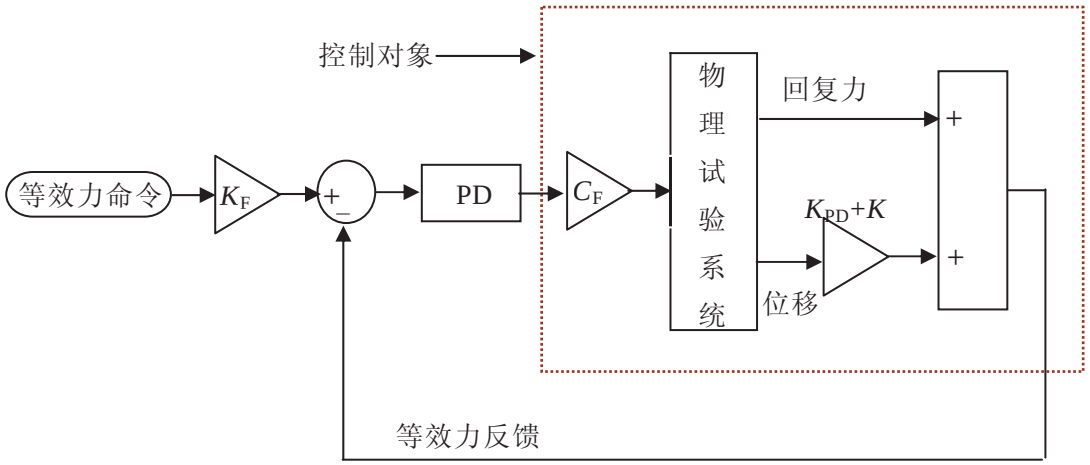


图2-2 实时子结构试验等效力方法原理[8]

采用等效力控制方法的实时子结构试验具体的计算方法总结如下：

(1) 确定试验子结构参数M_E、K_E、C_E和数值子结构参数M_N、C_N、K_N，确定积分步长。

(2) 确定等效力控制器类型及参数。

(3) 令 i=0。

(4) 测量$R_{E,i+1}$。

(5) 如果i=0，那么通过式(2-7)计算得到初始状态的等效力$F_{EQ,0}$，将初始等效力命令发送到控制系统中。

(6) 如果$i\neq0$，那么通过式(2-4)计算第i+1 步积分步长的等效力命令$F_{EQ,i}$，并将这个命令发送给等效力控制系统。

(7) 令 i=i+1。

(8) 回到 4 循环计算。

2.3 物理试验系统

在对实时子结构试验进行数值仿真的过程中，无论验证试验方法、检验试验的可行性还是对试验结果进行预测，都有必要对物理试验系统建模进行数值仿真。

本节将分别介绍电液伺服加载系统的伺服控制器、伺服阀、作动器这几部分。电液伺服加载系统是一个复杂的非线性系统，包含的非线性因素包括电液转换和控制元件的节流特性、及限幅等非线性等[55~57]。伺服阀的分辨

率高，频响高，因而系统控制精度高，动态响应快。阀控电液伺服加载系统相对于泵控电液伺服系统或者机液伺服系统更适合实时子结构试验。伺服阀部分和作动器部分的结构图如图 2-3所示。

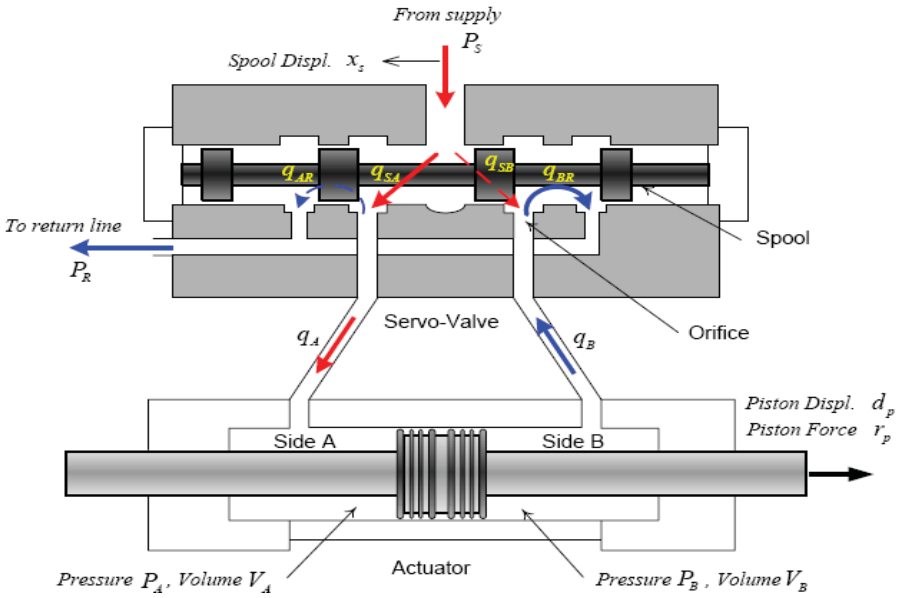


图2-3 伺服阀与作动器图示[26]

本文对试验子结构的加载采用位移控制，下文中应用的电液伺服加载系统使用PID控制器，位移命令通过控制器转换为电信号，控制器的电信号发送到伺服阀[26]。电液伺服系统PID控制器的输出信号与输入信号的关系为：

$$i_{PID}(s)=(P+I\frac{1}{s}+Ds)e(s) \tag{2-9}$$

其中，$i(s)$表示 PID 控制器输出的电流信号，$e(s)$表示位移命令与位移反馈的差值，参数 P、I、D 分别表示电液伺服加载系统 PID 控制器的比例增益、积分增益和微分增益。本文中定义作动器活塞在中立位置时的状态为工作点，此时作动器出力为零，定义作动器右侧为正方向，左侧为负方向。伺服阀根据电信号产生位移，将伺服阀阀芯相对中立位置的位移记为 x_v， x_v 与电流信号的关系为：

$$S(s)=\frac{x_v(s)}{i(s)}=\frac{\omega_s^2}{s^2+2\xi\omega_s s+\omega_s^2} \tag{2-10}$$

其中ξ_s、ω_s分别为伺服阀的等效阻尼比和等效圆频率，伺服阀位移的限值为

±2.54cm。

进出液压缸 A、B 的总流量可以用下式表示出来：

$$q_{\mathrm{A}}=q_{\mathrm{SA}}-q_{\mathrm{AR}}=k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}(\sqrt{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}|}\frac{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}|}{P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}}-\sqrt{|P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}|}\frac{|P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}|}{P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}}) \tag{2-11}$$

$$q_{\mathrm{B}}=q_{\mathrm{SB}}-q_{\mathrm{BR}}=k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}(\sqrt{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}|}\frac{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}|}{P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}}-\sqrt{|P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}|}\frac{|P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}|}{P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}}) \tag{2-12}$$

$$A_0=Wx_v \tag{2-13}$$

其中，q_{SA}表示单位时间内流入液压缸A的油量，q_{AR}表示单位时间内流出液压缸A的油量。q_{SB}表示单位时间内流入液压缸B的油量，q_{BR}表示单位时间内流出液压缸B的油量。k_v表示控制窗口处的流量系数，A_{o}表示伺服阀开口面积，计算方法如式(2-21)所示，W为阀套窗口的宽度。P_{S}为输油管内的压强，P_{R}为回油管内的压强。

本文以作动器向左加载为向负方向加载，如图 2-3所示。作动器向左侧运动时，$q_{\mathrm{SA}}=q_{\mathrm{BR}}=0$，作动器向右侧运动时，$q_{\mathrm{SB}}=q_{\mathrm{AR}}=0$。可以将式(2-11)和(2-12)分解为作动器向正方向加载和向负方向加载两种情况进行考虑。当作动器向负方向加载时，有：

$$q_{\mathrm{A}}=q_{\mathrm{SA}}=k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}\sqrt{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}|}\frac{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}|}{P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{A}}} \tag{2-14}$$

$$q_{\mathrm{B}}=-q_{\mathrm{BR}}=-k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}\sqrt{|P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}|}\frac{|P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}|}{P_{\mathrm{B}}-P_{\mathrm{R}}} \tag{2-15}$$

其中，x_{t}表示试验子结构位移，当作动器向正方向加载时有：

$$q_{\mathrm{A}}=-q_{\mathrm{AR}}=-k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}\sqrt{|P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}|}\frac{|P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}|}{P_{\mathrm{A}}-P_{\mathrm{R}}} \tag{2-16}$$

$$q_{\mathrm{B}}=q_{\mathrm{SB}}=k_{\mathrm{v}}A_{\mathrm{o}}\sqrt{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}|}\frac{|P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}|}{P_{\mathrm{S}}-P_{\mathrm{B}}} \tag{2-17}$$

设 $q(t)$ 表达式如式(2-18)所示：

$$q(t)=q_{\mathrm{A}}(t)-q_{\mathrm{B}}(t) \tag{2-18}$$

作动器是电液伺服加载系统的出力装置，通过液压缸内压强差向外出力。液压缸 A、B 的液体连续方程：

$$q_{\mathrm{A}}(t)=A_{\mathrm{P}}\frac{d}{dt}d_{\mathrm{P}}(t)+\frac{V_{\mathrm{A}}}{b_{\mathrm{E}}}\frac{d}{dt}P_{\mathrm{A}}(t)+\frac{P_{\mathrm{A}}\cdot A_{\mathrm{P}}}{b_{\mathrm{E}}}\frac{d}{dt}d_{\mathrm{P}}(t) \tag{2-19}$$

$$q_{\mathrm{B}}(t)=-A_{\mathrm{P}}\frac{d}{dt}d_{\mathrm{P}}(t)+\frac{V_{\mathrm{B}}}{\beta_{\mathrm{E}}}\frac{d}{dt}P_{\mathrm{B}}(t)-\frac{P_{\mathrm{B}}\cdot A_{\mathrm{P}}}{\beta_{\mathrm{E}}}\frac{d}{dt}d_{\mathrm{P}}(t) \tag{2-20}$$

其中，A_{P}表示A液压缸的横截面积，β_{E}为液压缸中油的压缩模量，$d_{\mathrm{P}}(t)$为作动器的位移。液压缸A的体积$A_{\mathrm{P}}(l/2+d_{\mathrm{P}})$液压缸B的体积为$A_{\mathrm{P}}(l/2-d_{\mathrm{P}})$，$l$表示作动器液压缸的长度。由于$d_{\mathrm{P}}$很小，所以认为$V_{\mathrm{A}}\approx V_{\mathrm{B}}$。

将式(2-19)、(2-20)代入(2-18)进行 Laplace 变换后得到下式：

$$q(s)=2sA_{\mathrm{p}}d^{\mathrm{m}}(s)+s\frac{V}{2\beta_{\mathrm{E}}}P_{\mathrm{L}}(s) \tag{2-21}$$

由于：

$$P_{\mathrm{L}}(s)=P_{\mathrm{A}}(s)-P_{\mathrm{B}}(s)=r^{\mathrm{m}}(s)/A_{\mathrm{P}} \tag{2-22}$$

式(2-21)又可以表示为：

$$q(s)=2sA_{\mathrm{p}}d^{\mathrm{m}}(s)+s\frac{V}{2\beta_{\mathrm{E}}A_{\mathrm{P}}}r^{\mathrm{m}}(s) \tag{2-23}$$

作动器传递函数为:

$$A(s)=\frac{r^{\mathrm{m}}(s)}{q(s)}=\frac{1}{s(2sA_{\mathrm{p}}d^{\mathrm{m}}(s)+\dfrac{V}{2\beta_{\mathrm{E}}A_{\mathrm{P}}})} \tag{2-24}$$

当试验子结构的阻尼和刚度为线性时，传递函数如式(2-25)所示。

$$T_{\mathrm{E}}(s)=\frac{d^{\mathrm{m}}(s)}{r^{\mathrm{m}}(s)}=\frac{1}{(M_{\mathrm{E}}s^2+C_{\mathrm{E}}s+K_{\mathrm{E}})} \tag{2-25}$$

其中M质量，C为作动器和试验子结构的阻尼系数之和，K为试验子结构的刚度；上角标m表示对试验子结构的测量值；下角标E代表试验子结构。

本文电液伺服系统使用的参数引自Colorado University实验室的电液伺服加载系统，June等对这个电液伺服加载系统进行了建模[27]，本文将应用这个模型建立等效力控制系统建模，并进行实时子结构试验数值仿真。本文中的分析均假定试验子结构的位移、速度和加速度分别与作动器的加载位移、速度和加速度相等。电液伺服加载系统的参数是：伺服阀阻尼系数ξ_{s}=0.7，伺服阀圆频率ω_{s}=817，分流系数k_{v}=4.325×10^{-3}m^4·s·N$^{0.5}$，输油管压强为P_{S} = 20.68Mpa，回油管压强P_{R} = 0.345Mpa，液压缸体积V=0.006936m^3，作动器油缸的横截面积A_{P}＝2.483×10^{4}mm^2，电液伺服加载系统的压差反馈增益$K_{\Delta\mathrm{P}}$=0.0002，研究表明，改变压差反馈增益的值相当于

改变系统阻尼[60,64]，控制器比例增益P取 3.5，积分增益I取 1，微分增益取零。

2.4 非线性等效力控制系统的线性化

当试验结构质量为M_{E}，阻尼为C_{E}，刚度为K_{E}，C_{F}为力位移转换系数时，整体控制对象的函数为如式(2-26)所示：

$$T_{\mathrm{EQ}} = C_{\mathrm{F}} T_{\mathrm{A}}(s)(K_{\mathrm{N}} + K_{\mathrm{PD}} + K_{\mathrm{E}} + C_{\mathrm{E}} s + M_{\mathrm{E}} s^2) \tag{2-26}$$

其中T_{A}(s)为物理试验系统的传递函数。2.3 节介绍的物理试验系统为非线性的，本节建立等效力控制系统控制对象传递函数需要对物理试验系统线性化。当试验子结构为线性时，仅考虑电液伺服加载系统非线性。2.3 节中建立的物理试验系统非线性体现在伺服阀饱和非线性和伺服阀位移与流量的非线性关系上。本节进行线性化的过程中忽略饱和非线性，对电液转换和控制元件的节流特性非线性处理方法是将方程中非线性项在工作点附近进行泰勒级数展开并取其一次项 [61~63]。当伺服阀向负方向运动时，将式(2-14)、(2-15)代入式(2-18)，并将式(2-18)进行泰勒级数展开并取其一次项得到流量放大系数K_{Q}和流量增益放大系数K_{C}，如式(2-27)、(2-28)所示。当伺服阀向正方向运动时得到K_{Q}、K_{C}与向伺服阀向负方向运动时的方法和数值均相同。

$$K_Q = \frac{\partial q_{\mathrm{SA}}}{\partial x_{\mathrm{v}}} = k_{\mathrm{v}} \sqrt{P_{\mathrm{S}} - P_{\mathrm{A}}} \tag{2-27}$$

$$K_{\mathrm{C}} = \frac{\partial q_{\mathrm{SA}}}{\partial P_{\mathrm{A}}} = \frac{k_{\mathrm{v}} A_{\mathrm{o}} \sqrt{P_{\mathrm{S}} - P_{\mathrm{A}}}}{2(P_{\mathrm{S}} - P_{\mathrm{A}})} \tag{2-28}$$

由式(2-27)、(2-28)可知，在工作点附近时，流量-压力系数K_C很小，可以忽略不计，K_{Q}取 1.074m^2/s。流量与伺服阀位移之间关系可以表示为：

$$q(s) = K_{\mathrm{Q}} x_{\mathrm{v}}(s) \tag{2-29}$$

这样，整个物理试验系统的传递函数可以表示为：

$$T_{\mathrm{A}}(s) = \frac{\dfrac{S(s)A(s)}{1 + S(s)A(s)K_{\Delta \mathrm{P}}} C(s) T_{\mathrm{t}}(s)}{1 + \dfrac{S(s)A(s)}{1 + S(s)A(s)K_{\Delta \mathrm{P}}} C(s) T_{\mathrm{t}}(s)} \tag{2-30}$$

其中，C(s)可用式(2-31)表示：

$$C(s)=\frac{i_{PID}(s)}{e(s)}=P+I\frac{1}{s}+Ds \tag{2-31}$$

具体形式如式(2-32)所示：

$$T_{\mathrm{A}}(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{(b_5s^3+b_6s^2+b_7s+b_8)}{s^8+a\ s^7+a_2s^6+a_3s^5+a_4s^4+a_5s^3+a_6s^2+a_7s+a_8} \tag{2-32}$$

式(2-32)中，Y(s)表示物理试验系统的输出，U(s)表示物理试验系统输入，而 $a_i(i=1,2\cdots8),b_i(i=1,2\cdots5)$ 为传递函数分子、分母的各项系数，取值由试验子结构的力学性能和加载系统特性确定。

取数值子结构的质量 M_{N}=0.916×10^{4}kg，试验子结构质量 M_{E} 取 0.49×10^{4}kg，数值子结构刚度 K_{N}=284.63kN/m，试验子结构刚度 K_{E}=284.63kN/m，结构阻尼比ξ取 0.05，结构总阻尼系数C取 18.622kN·s/m，试验子结构阻尼系数 C_{E} 取 5.43kN·s/m，数值子结构阻尼系数 C_{N} 取 13.19kN·s/m。本文所做数值仿真中，等效力控制系统的采样时间间隔和电液伺服加载系统的采样时间间隔为 1ms，积分时间步长为 10ms，电液伺服加载系统模型使用上面介绍的非线性数值模型。当等效力命令不大，使得电液伺服加载系统仍处于线性状态时，向等效力控制系统发送等效力阶跃命令，发现经过线性化的等效力控制系统仍然和非线性的等效力控制系统响应很接近，基本与非线性系统模型重合，此时，取等效力控制器为PI控制器，比例增益取 0.3，积分增益取 30，等效力响应如图 2-4。等效力PI控制器的积分增益取 211 时，等效力对阶跃命令地相应如图 2-5 所示，线性化的等效力控制系统的等效力响应依然与非线性系统吻合较好。向等效力控制系统发送二次命令，比较线性化的等效力和非线性等效力控制系统的响应，发现非线性等效力控制系统和线性化的高阶等效力控制系统的等效力响应能够很好吻合，如图 2-6 所示。

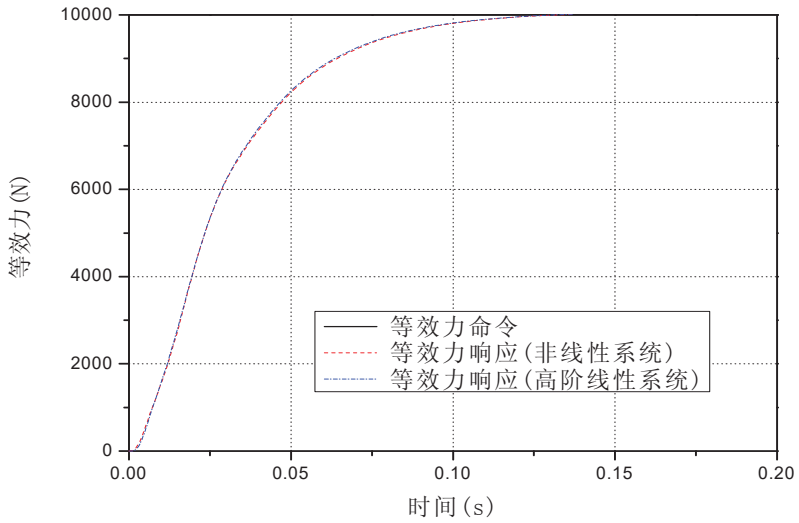


图2-4 线性与非线性等效力控制系统阶跃命令响应比较

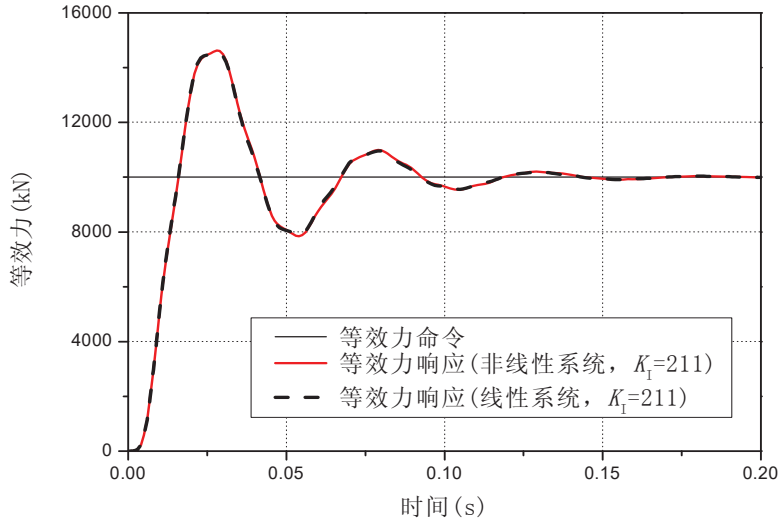


图2-5 K_I变化对等效力响应影响对比

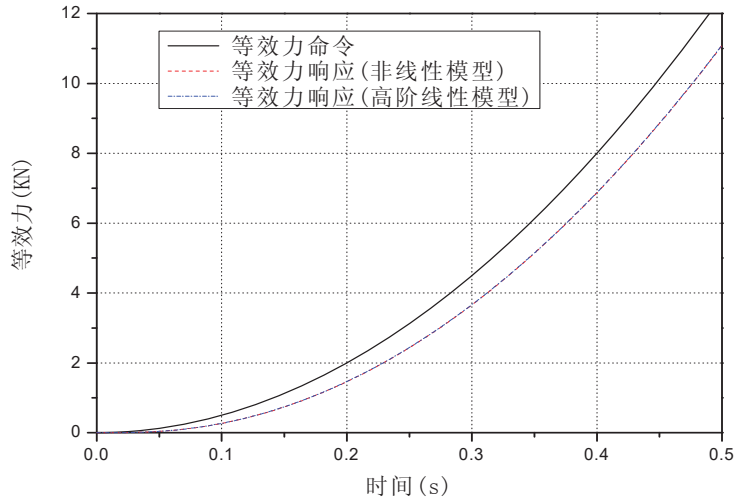


图2-6 线性与非线性等效力控制系统等效力二次命令响应比较

2.5 等效力控制系统的 LQG 控制器设计

试验子结构为多自由度时，等效力控制系统的输入命令为一个向量，此时宜采用现代控制方法替代经典控制方法对等效力系统进行控制。本文提出等效力控制方法的状态反馈内模设计，以单自由度结构为例子进行研究，控制系统的内模设计是将跟踪问题转换为调节问题。假设原有等效力控制系统可以线性化，并且其传递函数可以转化成如下状态空间的形式[66]：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases} \tag{2-33}$$

其中 **X** 是状态向量，u 是系统输入（纯量），y 是输出（纯量），取 **A**、**B**、**C**、**D** 为系统状态方程系数矩阵。等效力响应对等效力命令的跟踪误差设为 e，当等效力命令为阶跃命令时，u 是一个常数。

$$e = y - r \tag{2-34}$$

对式(2-34)左右两边求导得：

$$\dot{e} = \dot{y} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} \tag{2-35}$$

引入中间变量 **z** 和 **w**，定义为：

$$z = \dot{\mathbf{x}}, w = \dot{u} \tag{2-36}$$

$$\begin{pmatrix}\dot{e}\\ \dot{\mathbf{z}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & \mathbf{C}\\ 0 & \mathbf{A}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}e\\ \mathbf{z}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\ \mathbf{B}\end{pmatrix}w \tag{2-37}$$

当上式为能控系统时，可以找到反馈信号：

$$w=-K_1e-\mathbf{K}_2\mathbf{z} \tag{2-38}$$

当积分模块数量为一个时，系统能以零稳态误差跟踪阶跃信号，系统内部反馈信号为：

$$u=-K_1\int_0^t e(\tau)d\tau-\mathbf{K}_2\mathbf{x}(t) \tag{2-39}$$

本文中等效力控制系统框图形式如图 2-7所示，需要确定K_1和$\mathbf{K}_2$。控制对象就是包括物理试验系统在内的等效力控制试验系统。

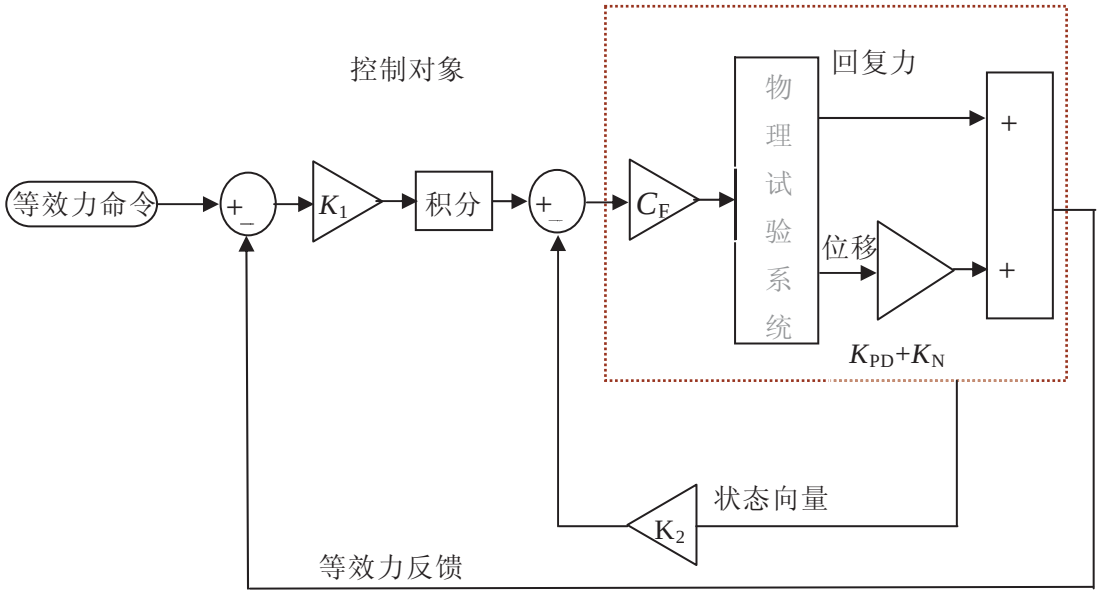


图2-7 等效力 LQR 内模设计原理图

K_1、K_2取值方法如下。如 2.4 节所述，等效力控制系统传递函数如式(2-32)所示。当试验子结构的质量阻尼和刚度均不为零时将式(2-32)所示的传递函数转换成状态方程有：

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\\ \dot{x}_5\\ \dot{x}_6\\ \dot{x}_7\\ \dot{x}_8\end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x}+\mathbf{B}u = \begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0&0&0\\ 0&0&1&0&0&0&0&0\\ 0&0&0&1&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&1&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&1&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&1&0\\ 0&0&0&0&0&0&0&1\\ -a_8&-a_7&-a_6&-a_5&-a_4&-a_3&-a_2&-a_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\\ x_5\\ x_6\\ x_7\\ x_8\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\beta_1\\ \beta_2\\ \beta_3\\ \beta_4\\ \beta_5\\ \beta_6\\ \beta_7\\ \beta_8\end{bmatrix}u \tag{2-40}$$

$$Y = \mathbf{C_0}\mathbf{x}+\mathbf{D}u \tag{2-41}$$

式(2-40)中的x_i表示等效力控制系统输出的i-1 阶导数，β_i表示状态方程系数**B**的元素。

将式(2-40)和(2-41)中的状态方程的系数代入(2-37)中，可以根据线性二次型经典最优控制算法（LQR算法）求得状态向量的反馈增益矩阵**K**，其中**K**为向量[K_1 $\mathbf{K}_2$]。定义系统的二次型性能泛函：

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty \{[e(t)\ \mathbf{z}(t)]^T\mathbf{Q}[e(t)\ \mathbf{z}(t)] + w^T(t)\mathbf{R}w(t)\}dt \tag{2-42}$$

式中，**Q** 为 9×9 的半正定矩阵，**R** 为 1×1 的正定矩阵。上面已经将传递函数转换为状态空间的可控标准型。权矩阵 **Q**、**R** 确定后，反馈增益可以通过 Matlab 中的 lqr 命令求得。

在现代控制工程中，对不可测量的状态的估计称为观测。本文选用 LQG 方法对状态向量进行估计。等效力控制系统对象的状态方程如式(2-40)、(2-41)。而后用全阶状态观测器估计结构的全部状态变量，取下面的目标函数：

$$J_e = E[\{\mathbf{x}(t)-\tilde{\mathbf{x}}(t)\}^T\{\mathbf{x}(t)-\tilde{\mathbf{x}}(t)\}] \tag{2-43}$$

其中，$\tilde{x}(t)$是对状态向量$x(t)$的估计。并构造全阶状态观测器的方程如式(3-23)：

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}+\mathbf{B}u+\mathrm{K}_e(\mathbf{Y}-\tilde{\mathbf{Y}}) \qquad \tilde{\mathbf{x}}(t_0)=\tilde{\mathbf{x}}_0 \tag{2-44}$$

$$\tilde{Y} = \mathrm{C}_0\tilde{x} \tag{2-45}$$

根据系统输入噪声和测量噪声确定LQG算法的权矩阵$\mathbf{Q}_e$、$\mathbf{R}_e$后使用Matlab命令lqe2 求观测器增益矩阵K_e，通过本文通过Simulink中的模块实现仿真过程，将采样时间间隔设为 1ms，积分步长设为 10ms。全阶状态观测器的原理框图见图 2-8。框图中的参数与前面所介绍的参数含义相同。

$$E\left[\varepsilon_1(t)\right]=0 \qquad E\left[\varepsilon_2(t)\right]=0 \tag{2-46}$$

$$E\left[\varepsilon_1(t)\varepsilon_1^T(\tau)\right]=\mathrm{Q}_e\delta(t-\tau)\quad \mathrm{Q}_e=\mathrm{Q}_e^{\mathrm{T}}\geq 0 \tag{2-47}$$

$$E\left[\varepsilon_2(t)\right]\varepsilon_2^T(t)=\mathrm{R}_e\delta(t-\tau)\quad \mathrm{R}_e=\mathrm{R}_e^{\mathrm{T}}>0 \tag{2-48}$$

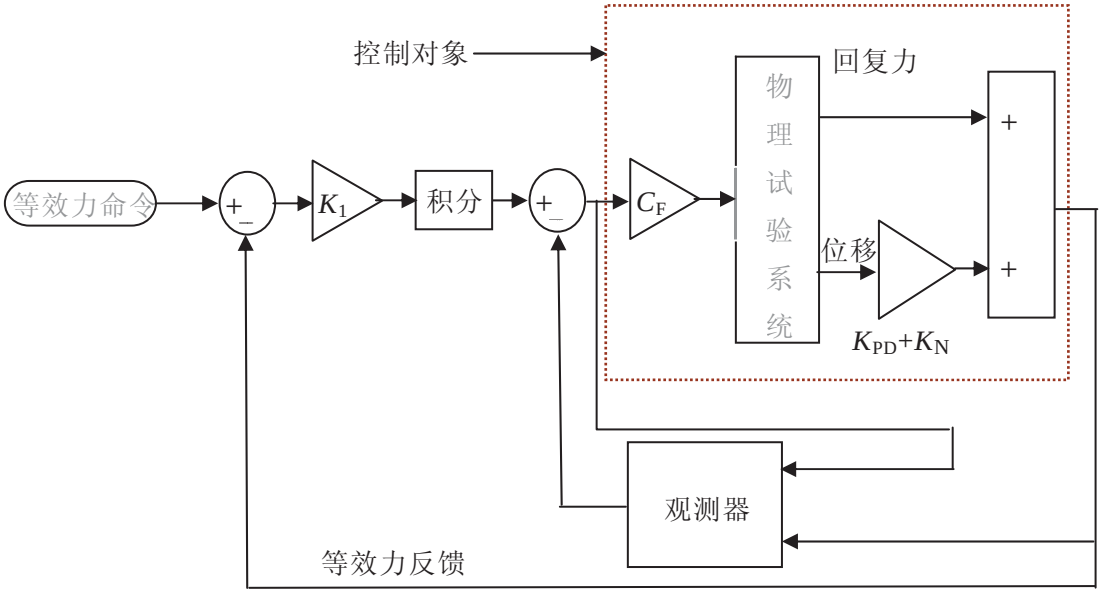


图2-8 LQG 等效力内模设计原理图

2.6 物理试验系统二阶模型与非线性模型的比较

在实时子结构试验中，物理试验系统中的电液伺服加载系统担当着重要的角色，其加载性能对试验的可行性有很大影响；在对实时子结构试验进行数值仿真时，加载系统的数学模型对数值仿真结果也有重要影响。对实时子结构试验进行数值仿真希望能够真实反应试验过程，发现试验过程中的问题。

上一节已经将非线性等效力控制系统进行了线性化，前面所得到的线性模型能够较好的反映物理试验系统的特性。文献[8]将物理试验系统简化为二阶传递函数模型，这样可以简化试验的数值仿真过程。二阶传递函数模型将物理试验系统影响因素归为两点，其一为物理试验系统的圆频率，另一个是物理试验系统的阻尼比。

选取二阶传递函数模型，可以得到如下传递函数，选取方法按照文献[8]得到如下结果：

$$T_A = \frac{\omega_A^2 e^{-\tau s}}{s^2 + 2\xi_A \omega_A s + \omega_A^2} \tag{2-49}$$

文献[8]认为纯时滞很小可以忽略不计，取 $\tau = 0$ 。式(2-49)可以写为：

$$T_A = \frac{\omega_A^2}{s^2 + 2\xi_A \omega_A s + \omega_A^2} \tag{2-50}$$

下面比较采用二阶传递函数和 2.3 节所介绍的非线性物理试验系统的阶跃命令响应。结构参数如下：数值子结构的质量M_N取 1.44×10^4kg, 试验子结构质量M_E取零，数值子结构刚度K_N取零，试验子结构刚度K_E取569.25kN/m，结构阻尼比ξ取 0.05，结构总阻尼C取 18.622kN·s/m，数值子结构阻尼C_N与结构总阻尼C相等，试验子结构阻尼C_E取零，等效力控制系统和电液伺服加载系统采样时间间隔均为 1ms，积分时间步长Δt取 10ms。等效力控制器选用PI控制器，比例增益K_P取 0.3，积分增益K_I取 30，电液伺服作动器参数与 2.3 节介绍相同。

按照文献[8]的方法对二阶传递函数进行拟合。在电液伺服系统加载时，当每一个积分步长内发送的位移命令不会很大，在这里取电液伺服加载模型的目标位移为 1 mm。在拟合过程中，仅改变试验子结构的刚度，而试验子结构的阻尼和质量不改变。当试验子结构的刚度为 569.25kN/m时，拟合得到的二阶传递函数的ω为 123.4，ξ为 1.117。试验子结构刚度为569.25kN/m 、14231.25kN/m 非线性物理试验系统与按照结构刚度为569.25kN/m时拟合的二阶传递模型对于位移阶跃命令的响应对比如图 2-9所示。从图 2-10 可以看出，当试验子结构刚度发生变化时，二阶传递函数响应不能与刚度变化后非线性物理试验系统的响应很好吻合。

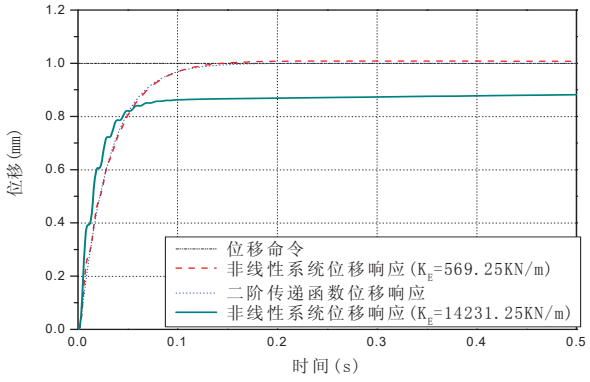


图2-9 位移响应比较

基于复杂物理试验系统的等效力控制系统对阶跃命令的响应与基于二阶传递函数物理试验系统的等效力控制系统对阶跃命令响应图 2-10所示。在这个仿真模拟过程中，仅改变试验子结构刚度，试验子结构的质量和阻尼不变。当试验子结构的刚度发生变化时，等效力响应发生了变化，二阶传递函数不能够体现出子结构性能改变对等效力响应的影响。通过图 2-11、图 2-12 可以看出，电液伺服加载系统非线性表现不明显。

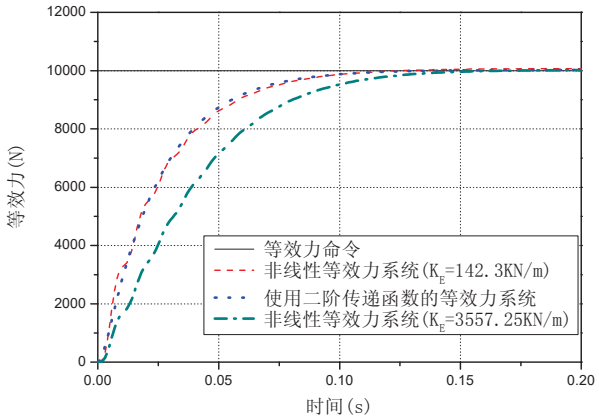


图2-10 等效力响应比较

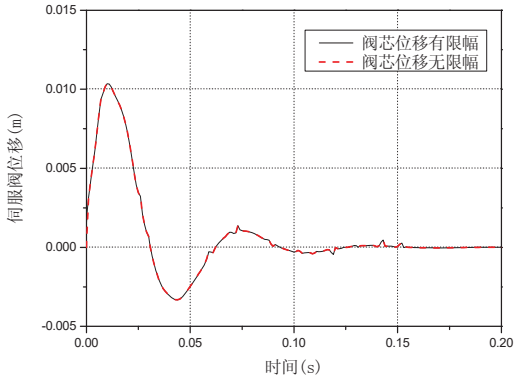


图2-11 伺服阀位移比较

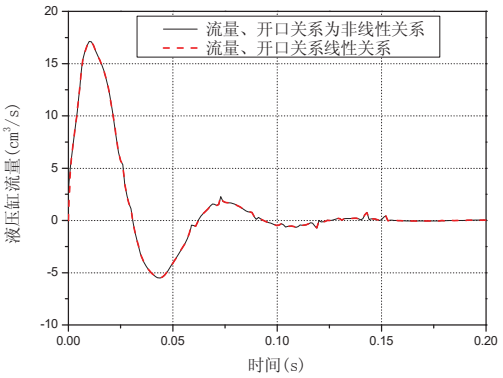


图2-12 液压缸流量比较

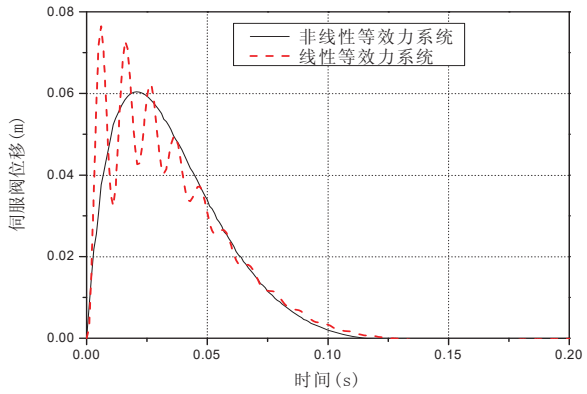


图2-13 速度响应比较(K_E=569.25kN/m)

从图 2-13 可以看出，即使结构的刚度不发生变化，拟合的二阶传递函数也不能描述试验子结构的速度响应，可以推想，拟合的二阶传递函数模型更无法描述试验子结构的加速度响应。

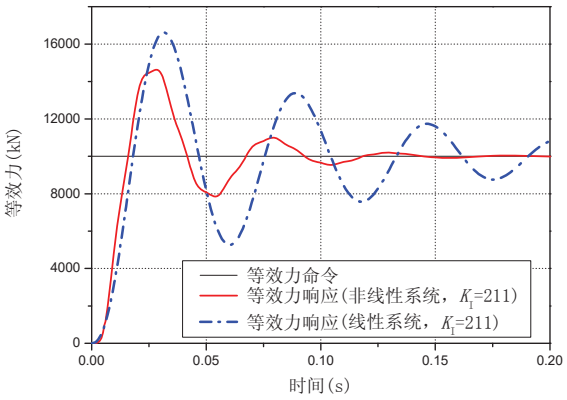


图2-14 K_I变化时等效力响应比较

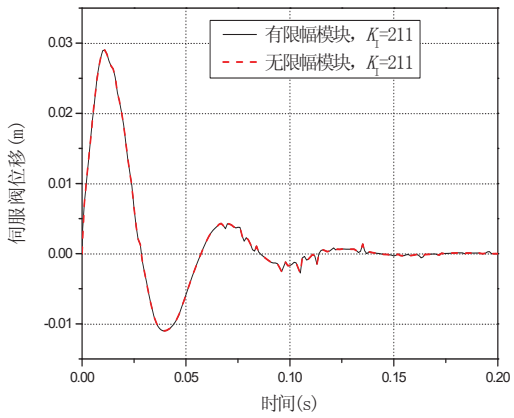


图2-15 伺服阀位移比较

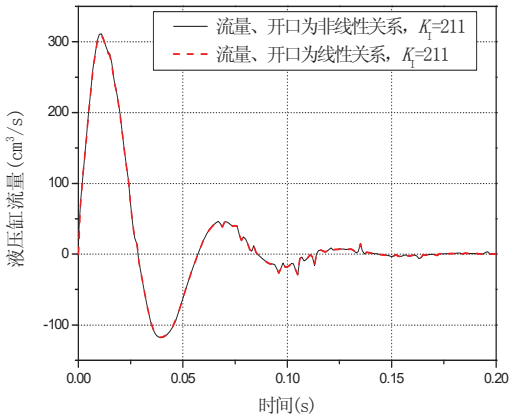


图2-16 液压缸流量比较

当等效力 PID 控制器积分增益变化时，即从 30 变为 211 后，向等效力控制系统发送 10000N 的等效力阶跃命令时，等效力响应如图 2-14 所示。发现为非线性等效力控制系统与 2.4 节介绍的线性化的等效力控制系统得等效力响应吻合得很好，而与物理试验系统基于二阶传递函数的等效力控制系统等效力响应不能较好的吻合。此时，电液伺服加载系统的非线性表现并不明显，伺服阀位移比较如图 2-15 所示，伺服阀开口与流量关系为非线性时液压缸流量与伺服阀开口与流量关系为线性时液压缸流量的比较如图 2-16 所示。物理试验系统的性能会很大程度上影响等效力控制系统的性能，二阶传递函数模型不能反映线性状态的电液伺服加载系统特性，这主要是由于电液伺服加载系统是高阶系统，而二阶系统无法体现高阶系统特性。

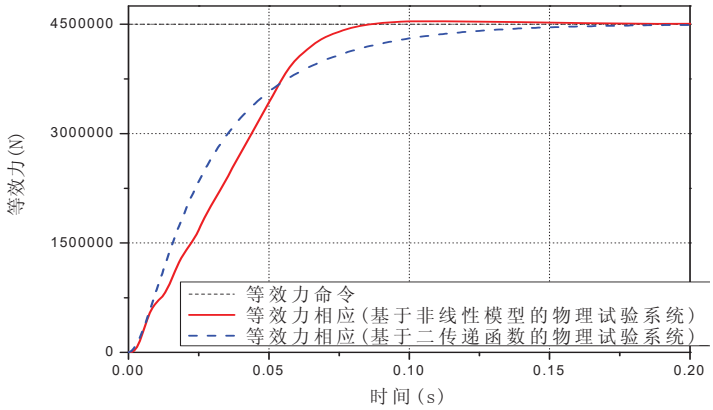


图2-17 等效力响应比较

当等效力阶跃命令发送较大时，物理试验系统可能进入非线性。如图 2-18 所示，用二阶传递函数描述的物理试验系统与用较为真实的物理试验系统是有很大差别的无法描述非线性因素的影响，从图 2-18、2-19 可以看出，伺服阀位移的限幅非线性和流量伺服阀位移非线性表现很明显。

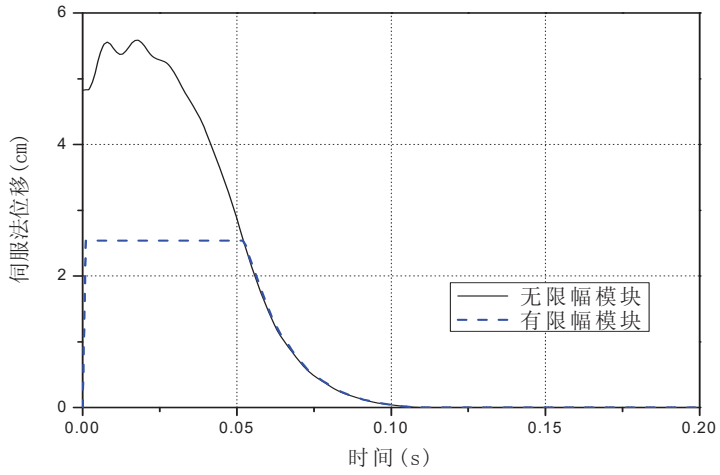


图2-18 限幅模块对伺服阀位移影响

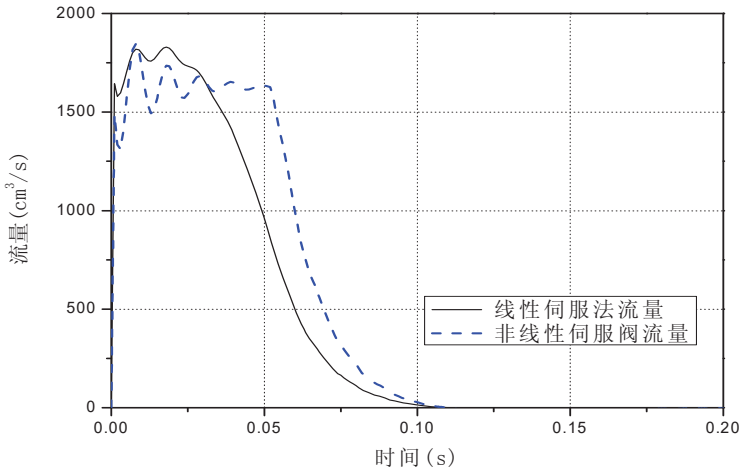


图2-19 泰勒级数展开线性化对伺服阀流量影响

从以上分析可以看出，二阶传递函数可以定性研究试验系统的响应趋势，但仅靠二阶传递函数模型中的两个参量描述复杂的试验系统工作过程是不够准确的，需要具体研究电液伺服加载系统的工作原理。在试验过程中试

验子结构动力特性可能随着加载逐渐变化，二阶传递函数不能描述实时子结构试验的试验子结构的动力特性变化对试验结果的影响。电液伺服加载系统呈现高阶系统特性和非线性特性，二阶传递函数无法描述。因此，使用能够较真实反映试验过程的仿真模型是十分必要的。因此，按照位移响应拟合的二阶传递函数无法描述试验子结构的速度响应和加速度响应，且当试验子结构的刚度发生变化时，同一个二阶传递函数无法表达出刚度变化对试验过程的影响。

2.7 本章小结

本章采用实时子结构等效力控制方法，应用能够反映物理试验系统特性的非线性仿真模型建立等效力控制系统仿真模型，并将等效力控制系统控制对象线性化，提出等效力控制系统的 LQG 控制方法。

第3章 位移相关型试件的等效力控制方法

3.1 引言

上一章建立了等效力控制系统模型。本章基于上一章建立的等效力控制系统模型，研究试验子结构为位移相关型结构的实时子结构试验等效力控制方法，分别应用等效力 PID 控制器和 LQG 控制器对等效力控制系统及实时子结构试验进行数值仿真分析。

3.2 位移相关型子结构试验的 PID 等效力控制系统

3.2.1 PID 等效力控制系统的数值仿真分析

实时子结构等效力控制系统中有两个控制器，假定电液伺服加载系统的内环的PID控制器参数选定，本节仅讨论外环等效力控制器。PID等效力控制系统的框图如图 2-1 所示。本章中的等效力命令的单步阶跃命令的值均为10000N；多步零阶保持命令均为幅值为 10000N并按照积分步长零阶保持的正弦命令；多步线性插值命令为幅值为 10000N并按在积分步长内线性插值的正弦命令，零阶保持的作用是使t_i时刻所得的值从t_i到t_{i+1}保持不变。

电液伺服控制系统的参数如 2.3 节中的参数。结构参数如下：结构自振周期T为 1 秒，结构总刚度K取 569.25kN/m，阻尼比为 0.05，总阻尼系数C取 18.622kN·s/m，积分时间步长Δt取 0.01 秒，等效力控制系统采样时间间隔 0.001 秒。取数值子结构的质量M_N为 1.44×10^4kg, 数值子结构阻尼C_N系数取 18.622kN·s/m，数值子结构刚度K_N取零，试验子结构质量M_E取零，试验子结构阻尼系数C_E取为零，试验子结构刚度K_E取 569.25kN/m。此时，电液伺服加载系统对位移阶跃命令的响应如图 3-2 所示，位移阶跃命令为 1cm。

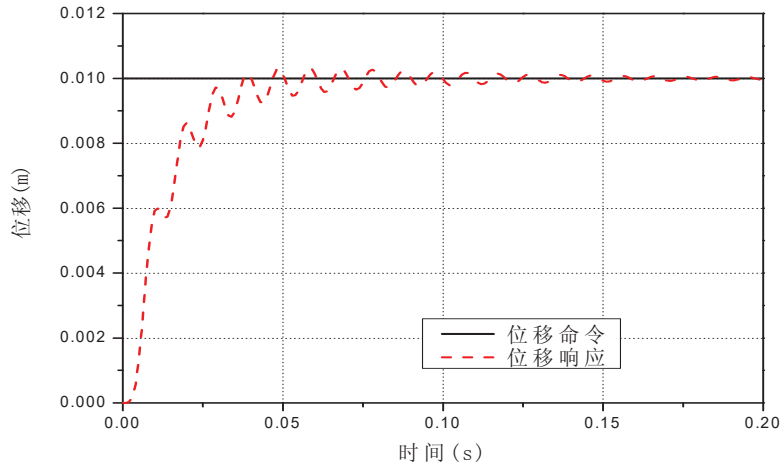


图3-1 比例增益对等效力阶跃命令响应的影响

首先，研究等效力P控制器对等效力控制系统的控制效果。当等效力控制系统采用比例增益控制器时，比例增益K_P分别取 0.9，0.3，3×10^{-7}，等效力响应如图 3-2、3-3 所示。图 3-2 为等效力控制系统对单步阶跃命令的响应，从图 3-2 中可以看到对于P控制器，随着比例增益的增大等效力响应的震荡逐渐剧烈，而当比例增益取值接近于零时，等效力响应仍然有较大的震荡。图 3-3 为等效力多步零阶保持命令的响应，通过图 3-3 可以看到，比例增益增大时响应加快，且震荡加剧。

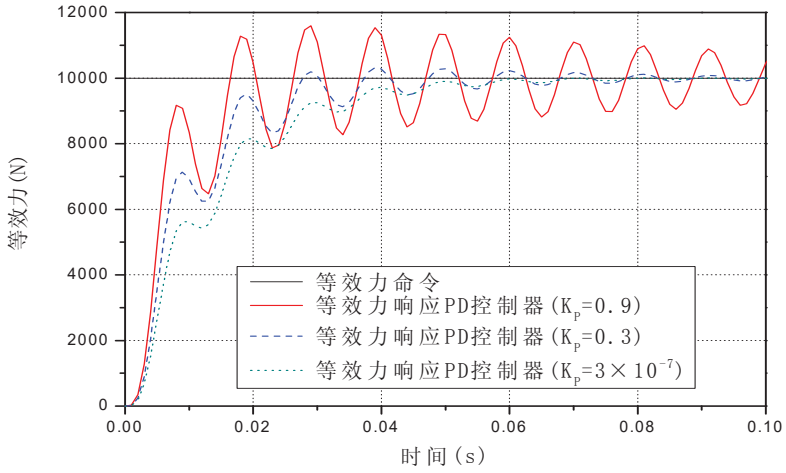
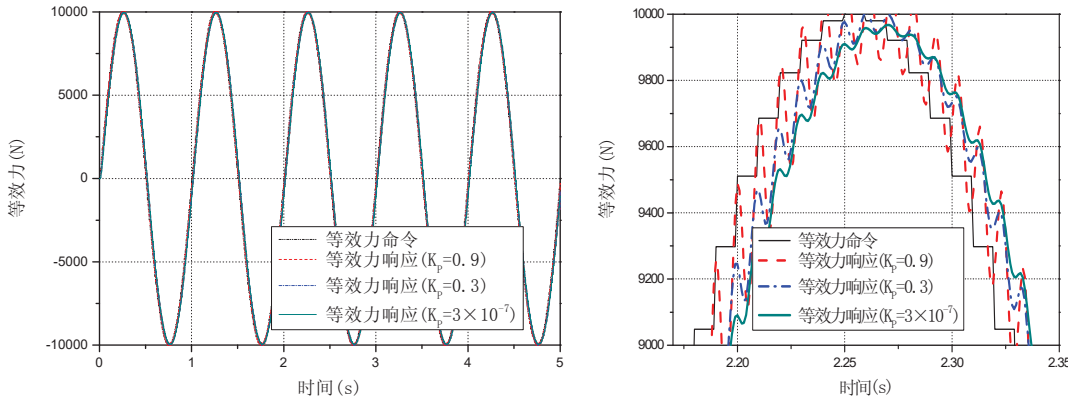


图3-2 比例增益对等效力阶跃命令响应的影响



a) 全局图　　b) 局部图

图3-3 比例增益K_P的变化对多步阶跃命令响应的影响

当等效力命令进行线性插值时，插值公式[8]：

$$F_{\mathrm{EQ},i+1}^{k}(t)=F_{\mathrm{EQ},i}+\frac{F_{\mathrm{EQ},i+1}-F_{\mathrm{EQ},i}}{n}k \quad (k=0,1,2,\cdots n) \tag{3-1}$$

根据式(3-1)得到的目标速度为：

$$v_{i+1}=\frac{F_{EQ,i+1}-F_{EQ,i}}{(K_N+K_{PD})\Delta t} \tag{3-2}$$

式(3-1)中的 n 表示一个积分步长内电液伺服加载系统进行 n 次加载，k 表示第 k 个加载步。当试验子结构为位移相关型试件时，等效力控制比例增益变化对斜坡等效力命令响应的影响如图 3-4 所示，等效力斜坡命令斜率为1000000N/s，从图 3-4 中可以看到，随着比例增益的增大，斜坡命令的响应加快。图 3-5 中的等效力命令为多步线性插值命令，从图 3-5 中可以看到，随着比例增益的变大，多步线性插值的等效力响应的时滞减小。

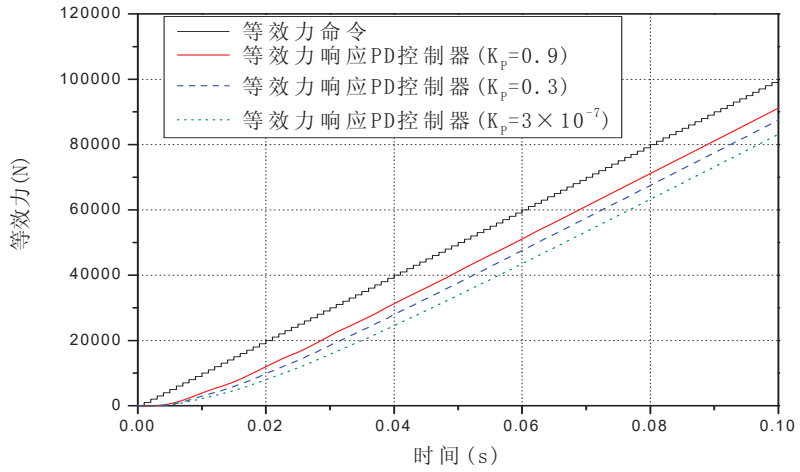
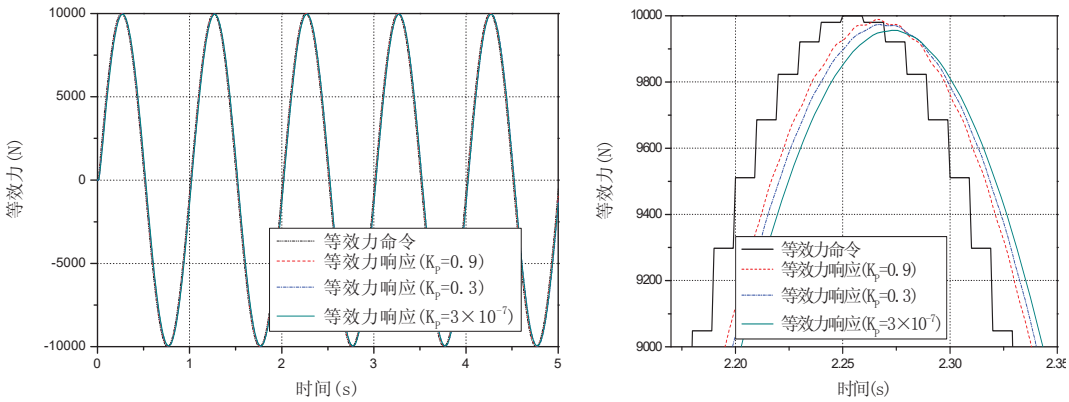


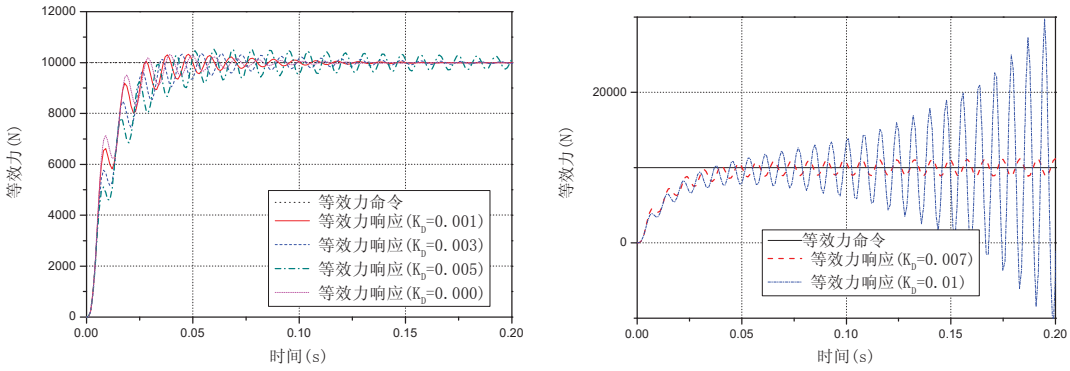
图3-4 比例增益对等效力斜坡命令响应的影响



a) 全局图　　b) 局部图

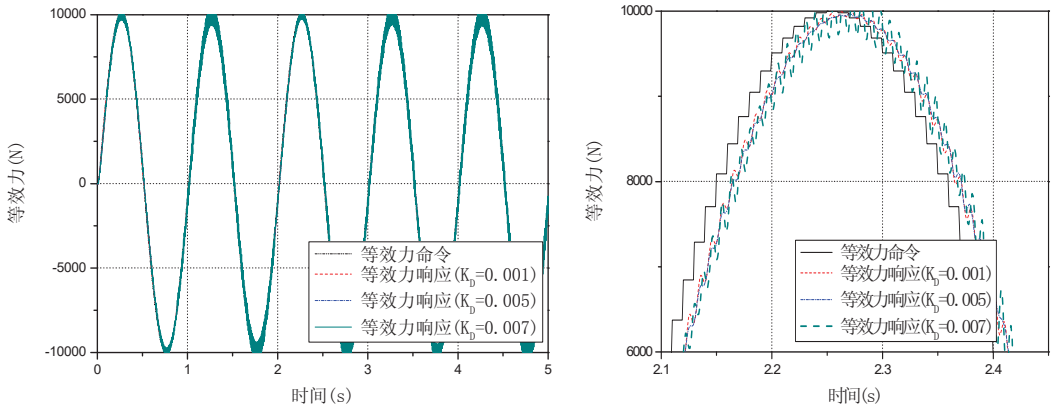
图3-5 比例增益K_P的变化对多步线性插值命令响应的影响

其次，研究向等效力 P 控制器中加入微分增益对等效力响应的影响。取等效力控制器比例增益 0.3。当向比例增益中加入微分增益时，等效力阶跃命令的响应如图 3-6，多步零阶保持命令的响应如图 3-7 所示。通过图 3-6、3-7 可以看到，当微分增益取值较小时，等效力阶跃命令的响应发生抖动，当微分增益取值较大时，等效力响应震荡。因此在等效力 PID 控制器中，需要将微分增益取为零。



a) $K_D \leq 0.005$　　b) $K_D > 0.005$

图3-6 微分增益对等效力阶跃命令响应的影响K_D



a) 全局图　　b) 局部图

图3-7 微分增益变化对多步阶跃命令响应的影响

研究等效力PI控制器中比例增益对等效力响应的影响。在PI控制中，比例增益依次取 0.9，0.3，3×10^{-7}，积分增益取 30，等效力阶跃命令响应如图 3-8，等效力零阶保持多部命令响应如图 3-10 所示。比例增益增大时单步等效力命令响应调节动作变快，但过大时出现震荡，K_p变化对多步等效力命令响应不明显。

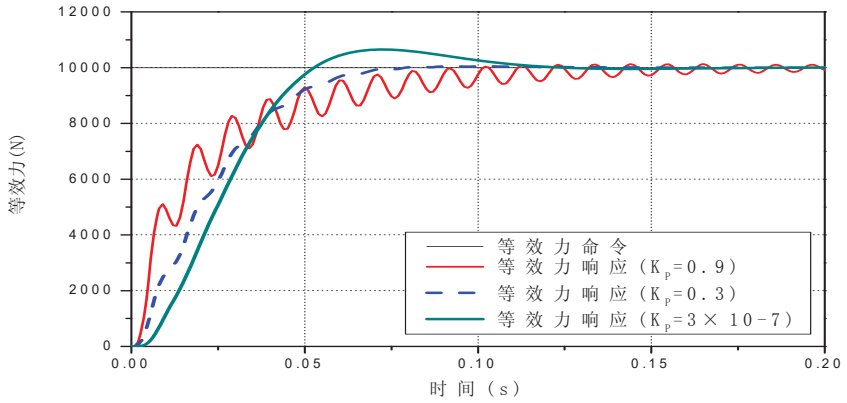
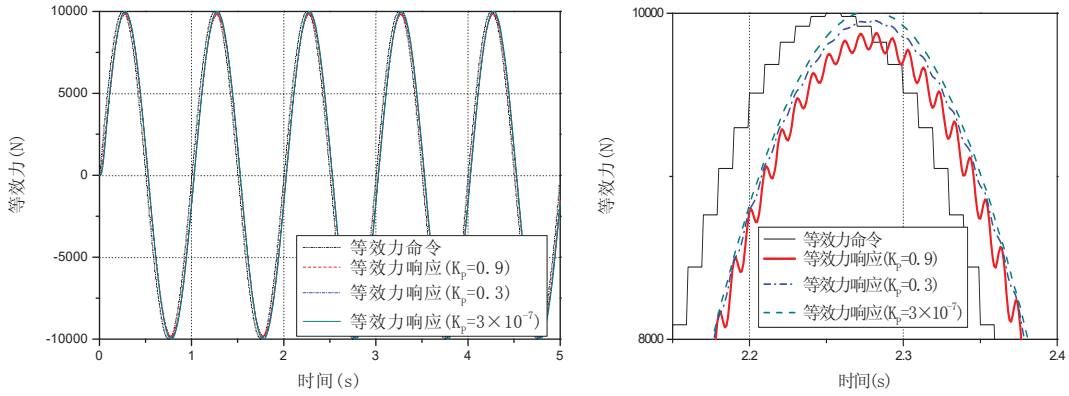


图3-8 等效力 PI 控制器中比例增益变化对阶跃命令响应的影响



a) 全局图　　b) 局部图

图3-9 PI 控制器中的比例增益对响应的影响

下面研究等效力PI控制器积分增益K_I对等效力响应的影响。因此取比例增益P为 0.3，研究积分增益变化对等效力响应的影响。从图 3-10、3-11 中可以看出积分增益K_I的变化对试验结果的影响。如图 3-10所示，单步阶跃命令响应中等效力PI控制器中的积分增益可以消除稳态误差，提高控制精度，当积分增益变大时，会引起超调，当积分增益取零时，出现稳态误差，稳态值约为 2300kN，约为等效力阶跃命令的 0.23，与文献[8]提出的等效力阶跃响应稳态值为阶跃命令的$K_P/(1+K_P)$基本吻合。通过图 3-11 可以看出，增大积分增益可以减小多步零阶保持命令响应的时滞，在积分步长末点可以

实现等效力命令，并且没有超调。

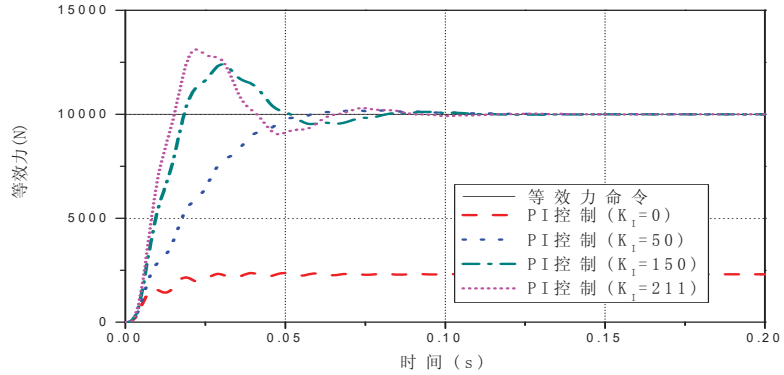
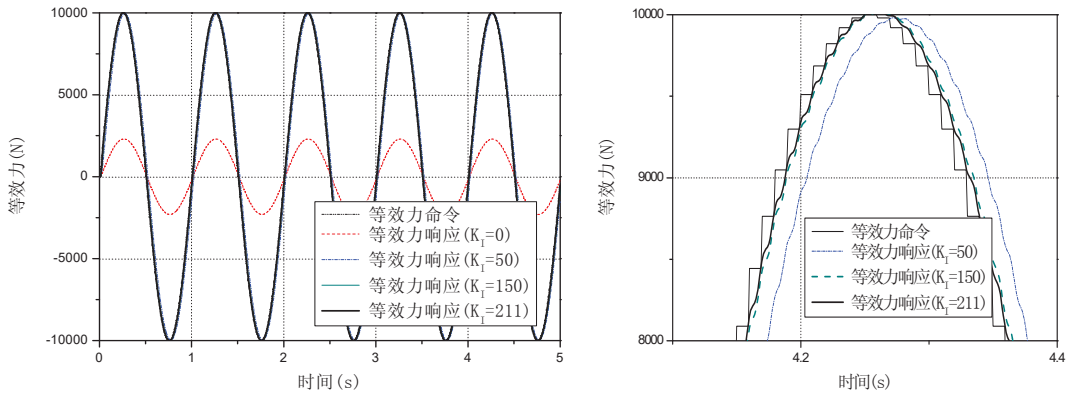


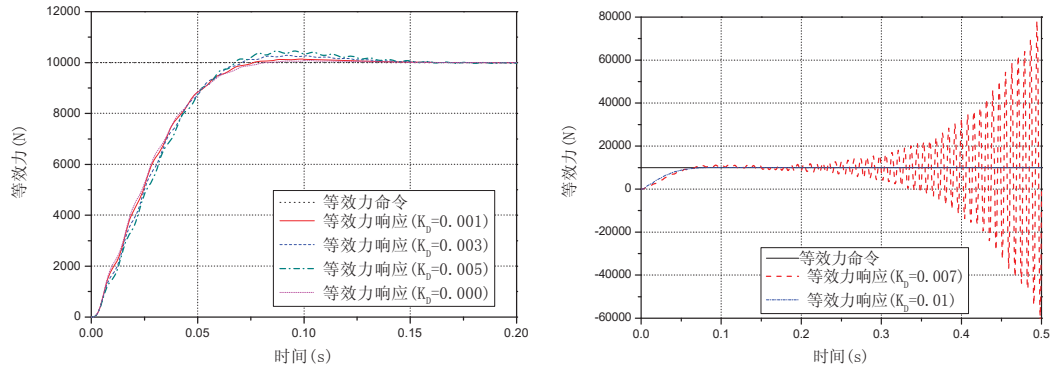
图3-10 PI 控制器中的积分增益变化对阶跃响应的影响



a) 全局图　　b) 局部图

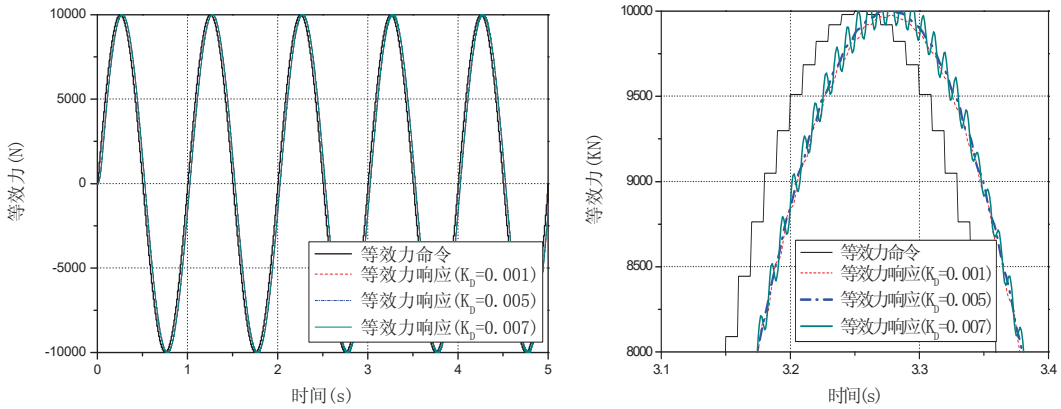
图3-11 积分增益K_I的变化对响应的影响

若在PI控制器中加入微分增益，取比例增益$K_P=0.3$，积分增益$K_I=50$，观察微分增益对等效力控制系统的调节效果，如图 3-12 所示。从图 3-12 中可以观察到当微分增益K_D很小时，对等效力控制系统的调节可以忽略不计，随着微分增益值增大等效力响应开始发生震荡。因此在后面的数值仿真分析过程中不使用K_D进行控制。微分增益也会使多步等效力命令的响应出现震荡的情况，如图 3-13 所示。



a) $K_D \leq 0.005$　　b) $K_D > 0.005$

图3-12 PID控制器中微分增益对等效力控制系统的影响K_D



a) 全局图　　b) 局部图

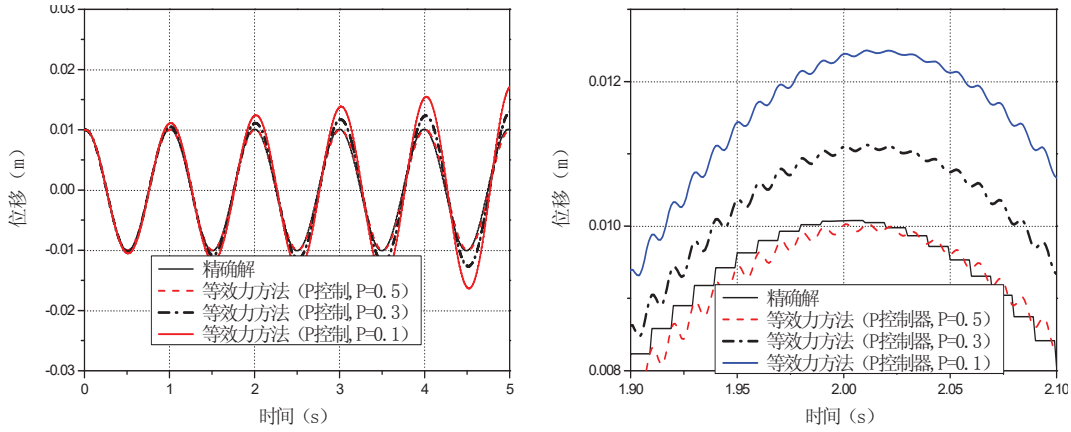
图3-13 微分增益变化对多步阶跃命令响应的影响

3.2.2 实时子结构试验数值仿真分析

等效力PI控制仿真分析表明，如果PI控制器的积分模块较大时，等效力阶跃响应会发生超调。但对于多步发送的等效力命令，可以提高积分增益取值来改善等效力控制系统的响应，减小等效力控制系统的时滞。积分增益取值大小的确定需要两步。首先，将等效力命令在每个积分步长内阶跃发送，适当调整积分增益的值，使积分步长末点等效力响应的值接近等效力命令。其次，进行无阻尼结构实时子结构试验的自由振动数值仿真确定积分增益参数。微调积分增益，使得自由振动位移时程与纯数值计算结果能够较好的吻

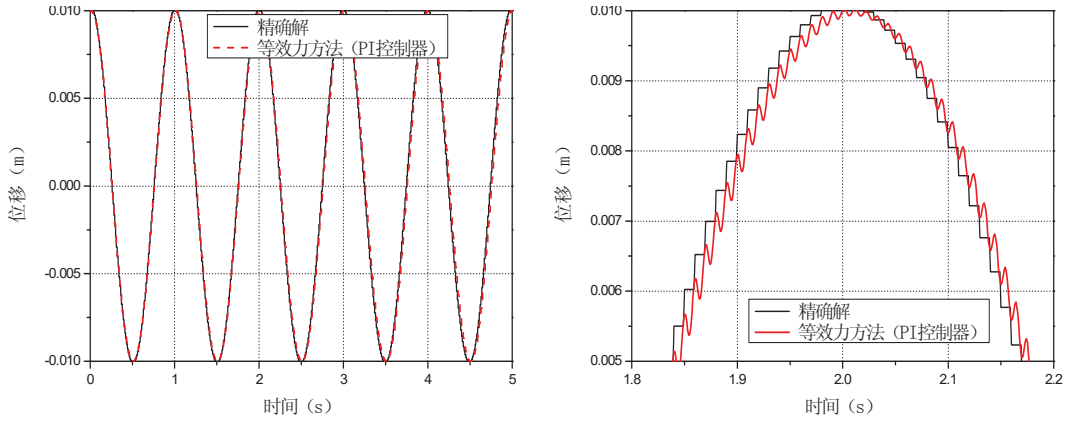
合。结构初始位移为 1cm，结构阻尼为零，其他参数同 3.2.1 节中算例所用参数，等效力P控制器中比例增益变化对位移反应的影响如图 3-14 所示，可见比例增益又消除稳态误差的作用，但是比例增益过大会使得位移反应震荡剧烈。采用PI控制器对结构自由振动实时子结构试验进行数值仿真，等效力PI控制器中比例增益K_P取 0.3，积分增益K_I取 211，自由振动实时子结构试验数值仿真位移时程如图 3-15 所示。此时，确定的积分增益值能够对等效力控制系统进行较好的控制，实现等效力响应对等效力命令良好的跟踪。本文中对线性结构使用微分求解器求数值解，对于非线性结构使用中心差分法求数值解，将这两种方法作为精确解与等效力控制方法进行比较。

通过图 3-16、3-17 可以看出，积分增益也有消除稳态误差的作用。当积分增益减小时，由于存在时滞，所以自由振动位移反应发散，随着积分增益的增大，时滞减小直至消除，自由振动位移反应不再发散，且随着积分增益的增大位移反应不发生震荡。因此，积分增益比比例增益消除时滞的效果好。



a) 全局图　　b) 局部图

图3-14 自由振动位移反应仿真结果(P 控制)



a) 全局图　　b) 局部图

图3-15 自由振动位移反应仿真结果(PI 控制)

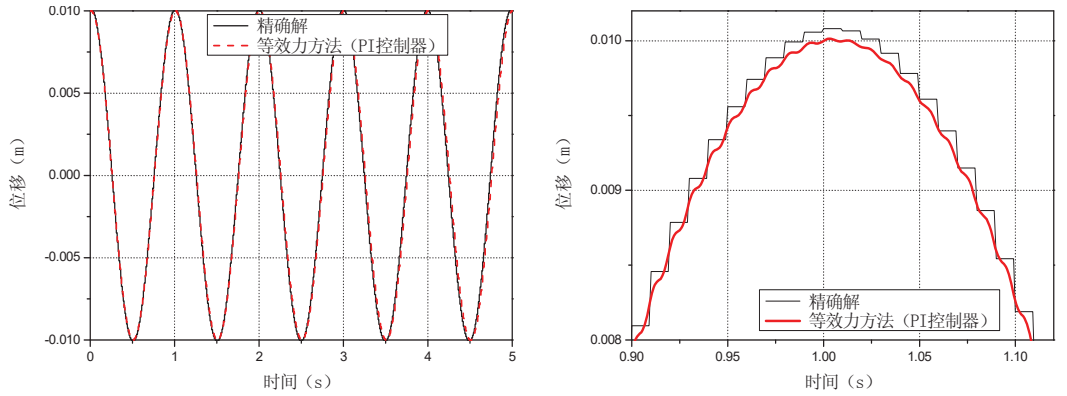


图3-16 自由振动位移反应仿真结果

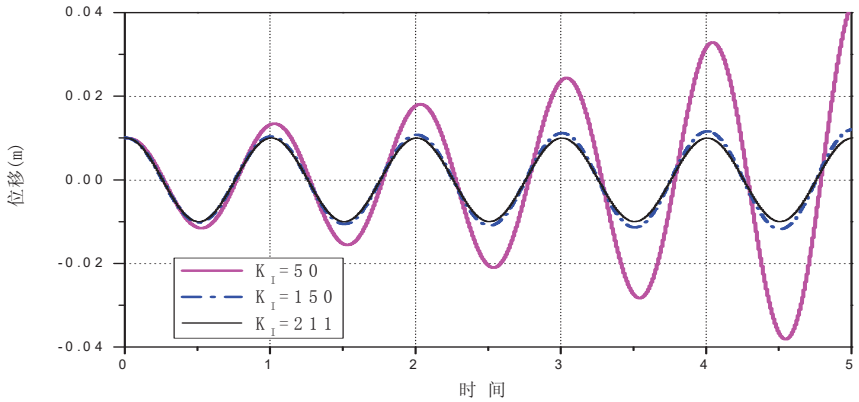
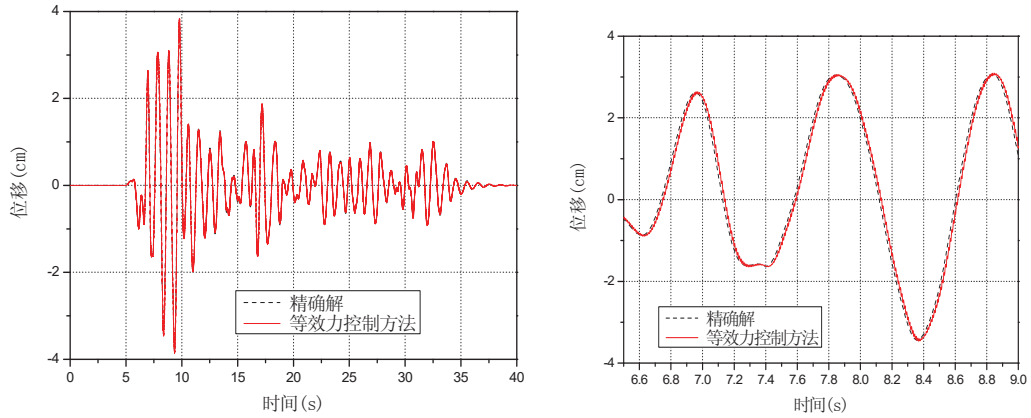
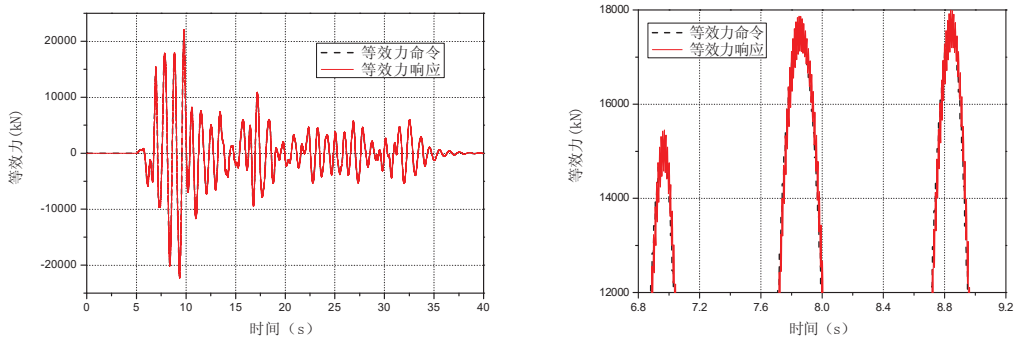


图3-17 积分增益对的自由振动位移反应仿真的影响



a) 全局图　　b) 局部图

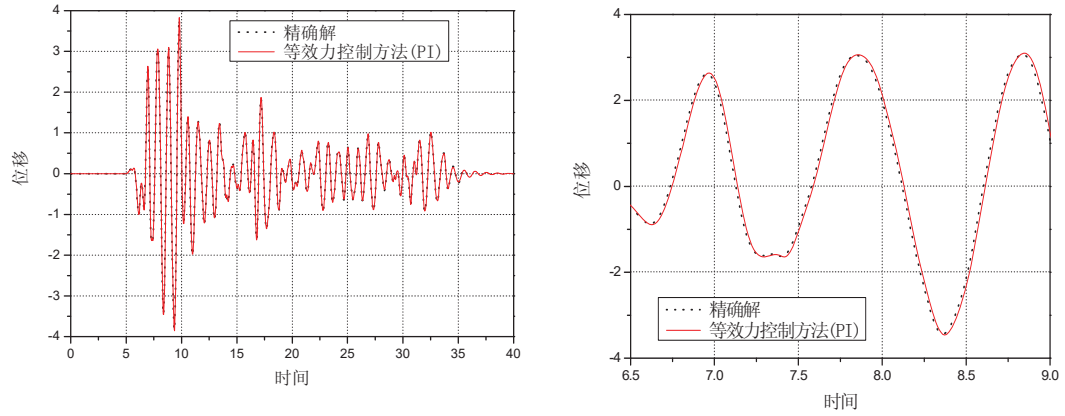
图3-18 地震作用位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

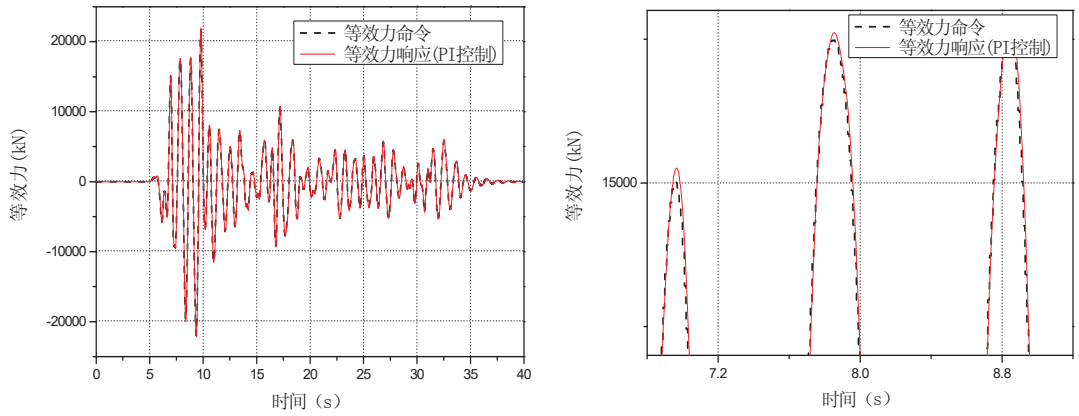
图3-19 地震作用等效力反应仿真结果

在 3.2.1 节中，介绍了 PID 等效力控制系统，下面采用 3.2.1 节中的结构参数，对单自由度结构作受迫振动试验的数值仿真。本文中进行的结构受迫振动试验的数值仿真均采用 El Centro(NS,1940)地震记录，峰值加速度为 0.16g。首先采用 P 控制器对等效力系统进行控制，比例增益取 0.3，时程仿真结果如图 3-18、3-19 所示；再使用 PI 控制的等效力系统进行数值仿真，PI 控制器比例增益取 0.3，积分增益取 211，时程仿真结果如图 3-20、3-21 所示。



a) 全局图　　b) 局部图

图3-20 地震作用的位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

图3-21 地震作用的等效力响应仿真结果

通过两种等效力控制器的比较，可以看出，采用 P 控制器的等效力控制系统响应对等效力命令的跟踪效果不好，在峰值处测量位移和等效力响应均发生较大震荡。如果等效力控制系统采用 PI 控制器，仿真结果和微分求解器计算结果比较，可以看到，吻合的比较好，等效力响应对等效力命令的跟踪效果比较好，仿真位移与数值计算结果相近，没有出现抖动或震荡的问题。

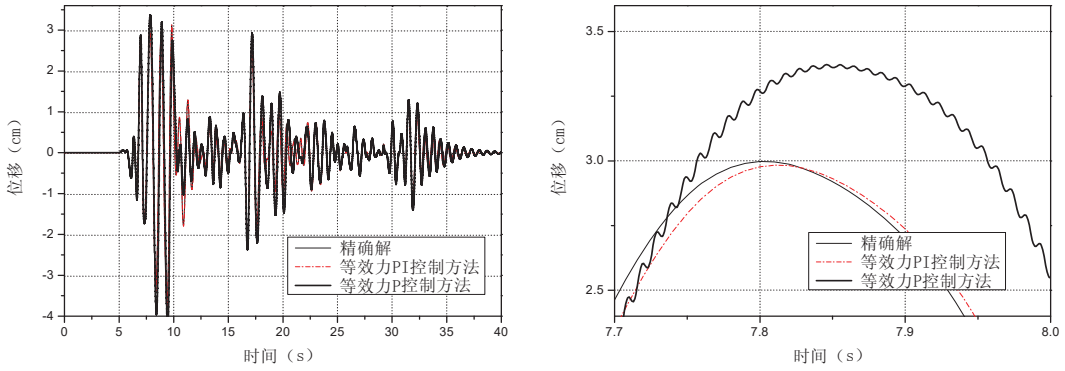
实际试验过程中有很多试件为非线性试件，因此有必要验证等效力控制

器对非线性试验子结构的实时子结构试验是否有效。试验子结构为非线性试件的实时子结构试验数值仿真是十分必要的。首先，选取力与位移关系为双曲正切模型的试验子结构验证实时子结构试验等效力控制方法。本算例中积分时间步长为 0.01s，回复力与位移关系如式(3-3)所示，P 控制器比例增益取 0.3，PI 控制器比例增益取 0.3，积分增益取 211。

$$R_{\mathrm{E}} = K_{\mathrm{E}} \tanh 2x \tag{3-3}$$

式(3-3)中 x 表示试验子结构位移。参数取值与 3.2.1 节算例相同。在地震作用下的采用等效力 PI 控制器和等效力 P 控制器得到的位移仿真结果如图 3-22 所示，力与位移关系如图 3-23 所示。

通过对比发现，PI 等效力控制器对试验子结构为非线性弹性试件的实时子结构试验数值仿真效果与精确解吻合得很好，而 P 控制器得到的位移响应存在震荡，不能与精确解较好吻合。

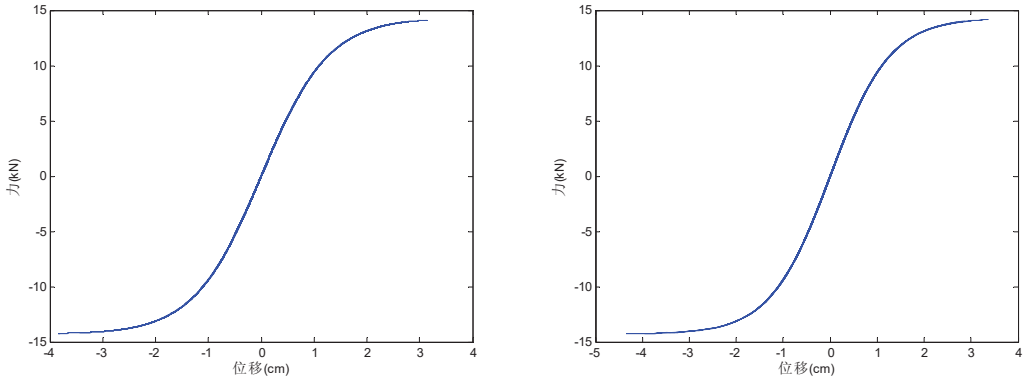


a) 全局图　　b) 局部图

图3-22 地震作用位移仿真结果

试验子结构回复力模型为双线性模型试件的实时子结构试验数值仿真，力学模型如图 3-24 所示，R_{E}表示回复力，F_{y}表示屈服力。实时子结构试验模拟真实结构在地震作用下响应时，试验子结构可能进入弹塑性变形状态。对试验子结构进入塑性变形状态的实时子结构试验进行仿真分析是十分必要的。C_{F}取值如式(2-11)所示，K_{E}取弹性阶段刚度。结构参数取值：试验子结

构起始弹性刚度K_E取 569.25kN/m，α取 0.3，α是结构达到屈服后的刚度与结构弹性状态下刚度的比值，试验子结构屈服位移为 1.27cm，其他参数与 3.2.1 节算例相同。当等效力控制器参数取值合适的情况下，实时子结构试验数值仿真结果与中心差分法数值计算结果吻合较好，如图 3-25、3-26 所示。对于回复力模型为双线性的结构，采用等效力控制PI方法的实时子结构试验能够很好的评估试验子结构的特性，而采用P控制方法不能很好的对等效力控制系统进行较好地控制，位移响应出现抖动现象，不能很好的使位移与精确解相吻合。



a) PI 控制　　b) P 控制

图3-23 双曲正切试验子结构力与位移关系

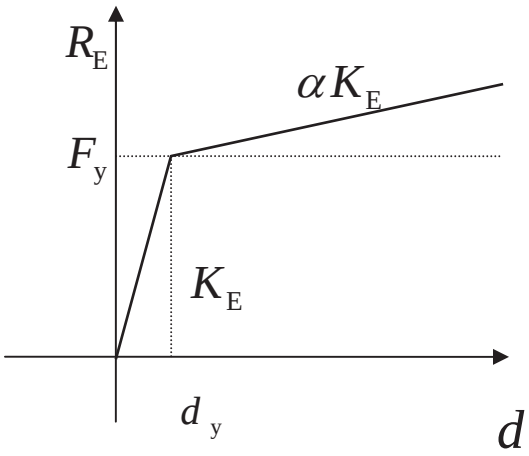
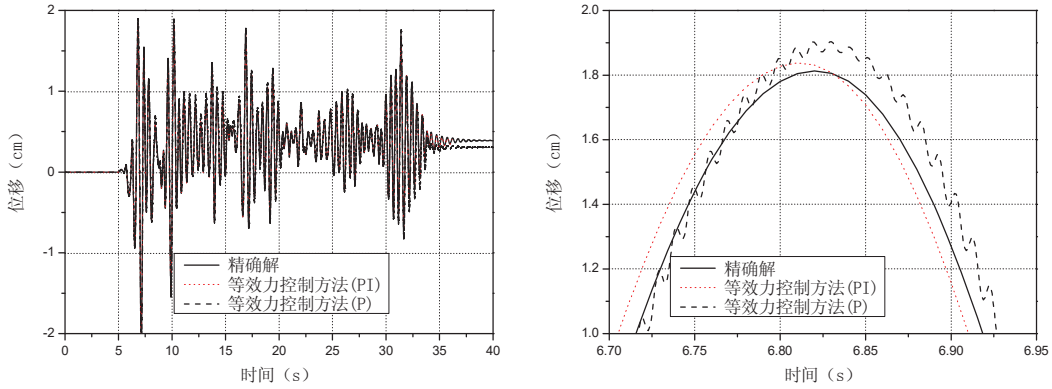
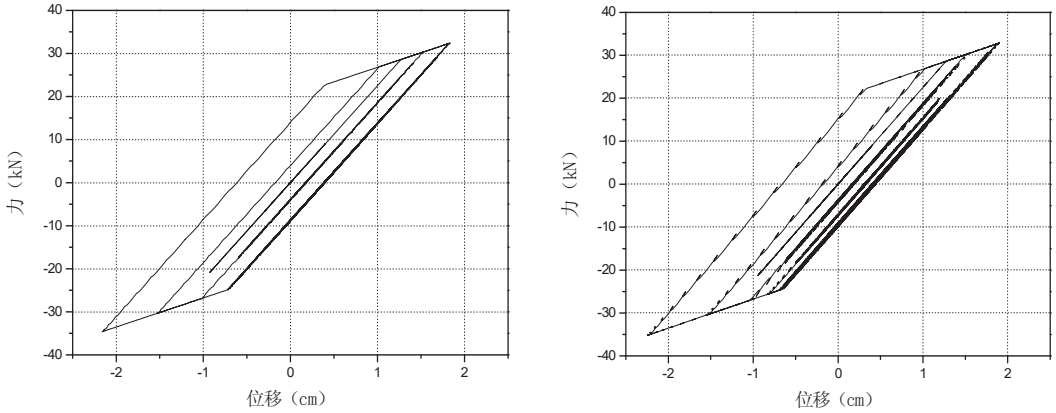


图3-24 双线性回复力力学模型



a) 全局图　　b) 局部图

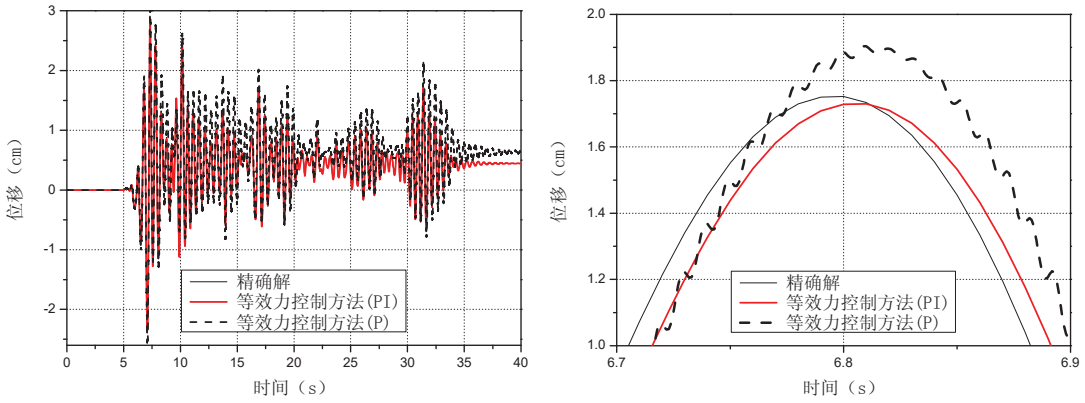
图3-25 地震作用位移仿真结果



a) PI 控制　　b) P 控制

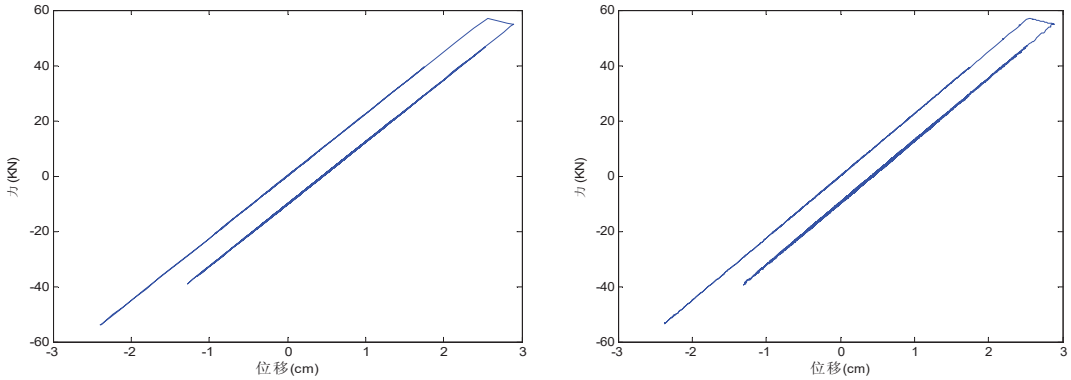
图3-26 力与位移关系仿真结果

结构进入屈服阶段后，其刚度可能变成负值。试验子结构屈服位移 2.54cm，取 α 为-0.3，其他参数同本节上面的算例。在地震作用下，结构的位移反应如图 3-27 所示，试验子结构力与位移关系如图 3-28 所示。对于这种类型的结构，实时子结构的等效力 PI 控制方法仍然有很好试验效果，而等效力控制系统采用 P 控制时，位移存在抖动现象，且与精确解不能较好的吻合。



a) 全局图　　b) 局部图

图3-27 地震作用位移仿真结果



a) PI 控制　　b) P 控制

图3-28 双线性力与位移关系仿真结果

3.3 位移相关型子结构试验的 LQG 等效力控制系统

3.3.1 等效力 LQG 控制器设计

本文 2.5 节介绍的等效力 LQG 控制算法，但是此时不能直接应用于位移相关型试件，因为当试验子结构的质量和阻尼若忽略不计时，系统的状态方程发生了变化，所以 LQG 方法求解过程中用到的权矩阵均发生变化。等

效力控制系统的控制对象传递函数可以表示为：

$$T(s)=C_{\mathrm{F}}T_{\mathrm{A}}(s)(K_{\mathrm{N}}+K_{\mathrm{PD}}+K_{\mathrm{E}})=T_{\mathrm{A}}(s) \tag{3-4}$$

此时，将T_{A}(s)可以转换为一个四阶状态空间方程，形式同式(2-33)。首先需要通过LQR算法求得增益矩阵[K_1 $\mathbf{K}_2$]，$\mathbf{K}_2$为四阶向量[K_0 K_1 K_2 K_3]，K_{i}(i=0,1,2,3)，分别为等效力、等效力一阶导数、二阶导数、三阶导数的反馈增益。通过调试，本节中$\mathbf{Q}$为 5×5 的半正定矩阵，本节权矩阵$\mathbf{Q}$取为：

$$Q=\alpha\cdot\begin{bmatrix} Q_{11} & & & & \\ & Q_{22} & & & \\ & & Q_{33} & & \\ & & & Q_{44} & \\ & & & & Q_{55} \end{bmatrix} \tag{3-5}$$

其中，Q_{11}表示误差项e的权系数通过数值仿真发现，Q_{11}变化对系统超调有很大影响。分别取Q_{11}为$\lambda\cdot C_{\mathrm{F}}$，$Q_{22}$为等效力三阶导数对应权系数$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^6$，$Q_{33}$为等效力二阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^4$，$Q_{44}$为等效力一阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^2$，$Q_{55}$为等效力对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}$。R为正定矩阵，取为$\beta\cdot C_{\mathrm{F}}$。当α和$\beta$比值一定时，通过改变$\lambda$调节等效力响应。本文取$\alpha$为 1 ，$\beta$为 1×10^{-4}。

由状态方程求状态反馈增益$\mathbf{K}$，即[K_1 $\mathbf{K}_2$]，之后对状态向量进行估计。采用Matlab命令lqe2($\mathbf{A}$,$\mathbf{D}$,$\mathbf{C}$,$\mathbf{Q}_{\mathrm{e}}$,$\mathbf{R}_{\mathrm{e}}$)计算。本文取$\mathbf{Q}_{\mathrm{e}}$为 0.001，取$\mathbf{R}_{\mathrm{e}}$为 0.01$\mathbf{I}$，由于本文仅对等效力进行测量，因此取$\mathbf{R}_{\mathrm{e}}$为一维矩阵，LQG控制原理图如图 2-8所示。

3.3.2 LQG 等效力控制系统仿真

等效力控制系统采用LQG控制器对于单步等效力阶跃响应命令的响应如图 3-29所示，结构参数取值同 3.2.1 中算例。从图 3-30 可以看出等效力控制系统对阶跃命令的响应得调节时间大约为 0.1s左右。控制效果表明等效力控制系统不能满足在一个积分步长内实现等效力命令。因此需要考察多步阶跃命令响应，从而确定试验的可行性和等效力控制器参数的取值。

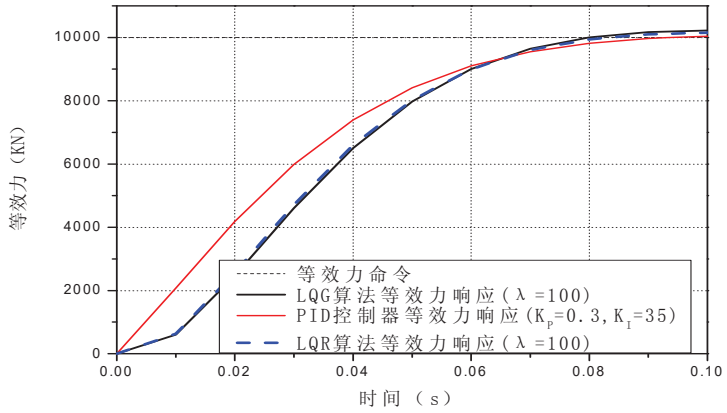
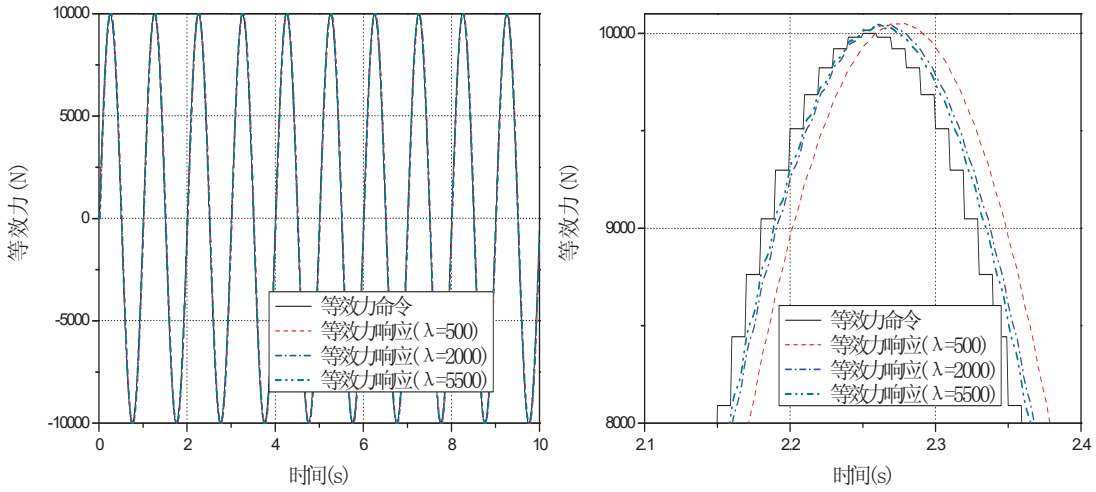


图3-29 等效力阶跃响应

输入等效力命令为多步线性插值命令时，参数选取如 3.2.1 节中的算例，使用 LQG 方法对等效力控制系统进行仿真分析，等效力响应随 λ 变化规律如图 3-30，等效力响应不会出现抖动现象，且随 λ 适当的增大等效力时滞减小，能够使等效力响应在积分步长末点达到等效力命令。



a) 全局图　　b) 局部图

图3-30 λ 变化对等效力响应的影响

3.3.3 实时子结构试验数值仿真分析

通过 3.3.2 的分析可以看出，采用等效力 LQG 控制方法，增大权矩阵

中参数 λ 有减小等效力响应时滞的作用。本小节使用 3.3.2 节中确定的 LQG 参数进行实时子结构试验的数值仿真分析。

首先进行无阻尼结构自由振动的时程仿真。结构参数、积分时间步长及等效力控制系统采样时间间隔如 3.2.2 中无阻尼结构自由振动算例的参数。通过调节使 λ 可以等效力控制算法能够很好的模拟无阻尼结构自由振动时程，如图 3-31 所示，此时 λ 取 5500。通过无阻尼结构自有振动仿真发现，当 λ 取值较小时位移响应较慢，存在时滞，时滞的负阻尼作用使结构位移响应发散。

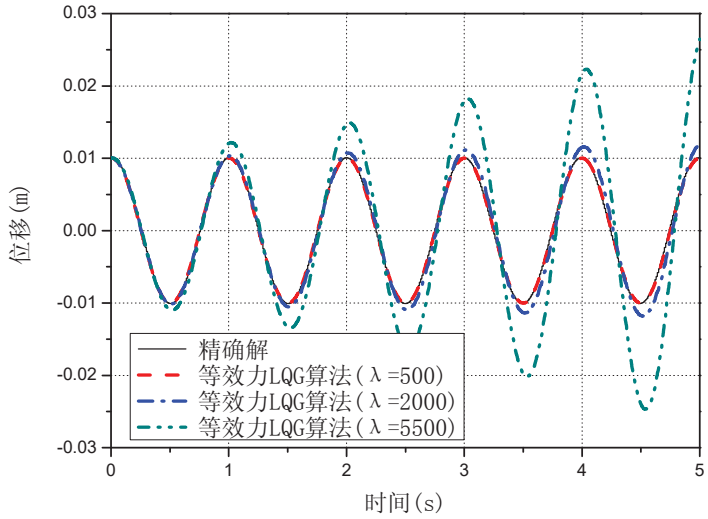


图3-31 LQG 算法自由振动位移反应仿真结果

有阻尼结构在地震作用下的位移反应仿真结果如图 3-32 所示。结构参数与 3.2.1 节中算例的结构参数相同，λ取 5500。仿真结果与数值计算结果吻合较好。等效力响应对等效力命令的跟踪效果如图 3-33 所示。通过对地震作用下的实时子结构试验数值仿真可以看到，当通过上面介绍的方法对 K_1，K_2进行取值时，等效力控制系统有较好的控制效果，采用等效力控制方法能够进对实时子结构试验进行很好的数值仿真。

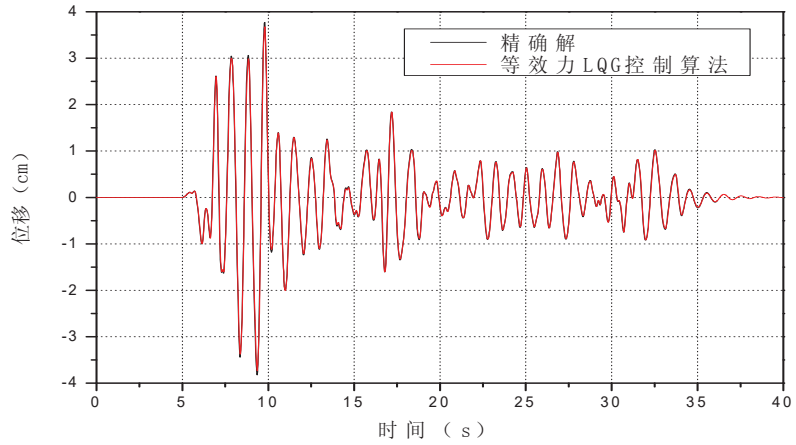


图3-32 地震作用位移反应仿真结果

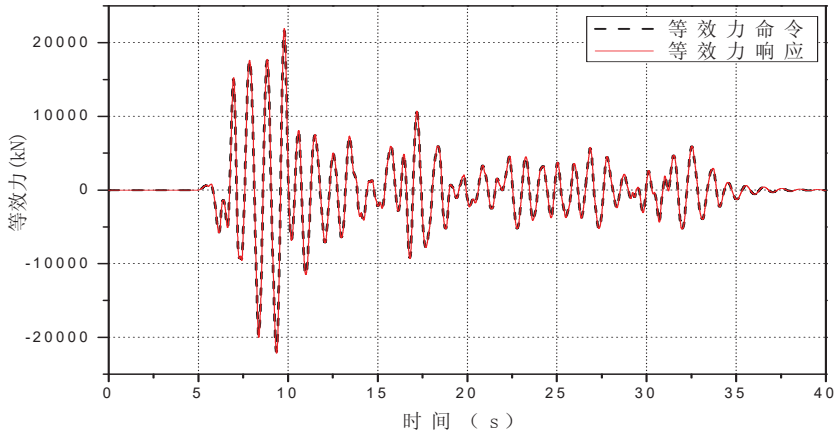


图3-33 地震作用等效力响应仿真结果

当试验子结构为非线性时，首先，对试验子结构回复力模型为式(3-2)形式的实时子结构试验进行数值仿真分析，试验中使用的各参数选取 3.2.3 节中对应算例，数值仿真结果如图 3-34 所示。从图 3-34 可以看出，等效力LQG控制器对于试验子结构为非线性弹性的试件数值仿真效果很好。因为等效力控制系统的LQG控制要写出系统的状态方程，所以对于非线性刚度试件，应用LQG算法有一定困难。本文在设计等效力LQG控制器时以参数K_E代替试验子结构刚度，近似写出等效力控制系统的状态方程。

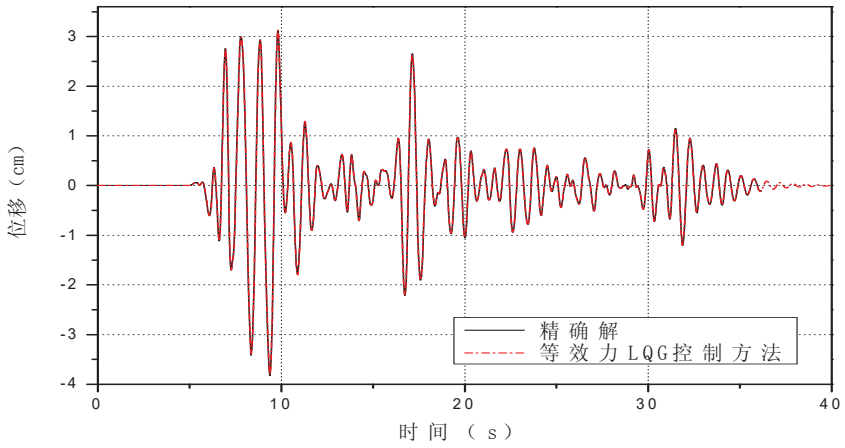


图3-34 地震作用位移反应仿真结果

在地震作用下，结构可能进入弹塑性变形状态。如当试验子结构回复力模型为双线性模型时，实时子结构试验的位移反应曲线及力与位移的关系如图 3-35~3-37 所示，参数取值与 3.2.2 对应算例参数相同。可以看到，当等效力控制器参数取值合适的情况下，实时子结构试验数值仿真结果与精确解计算结果吻合较好。

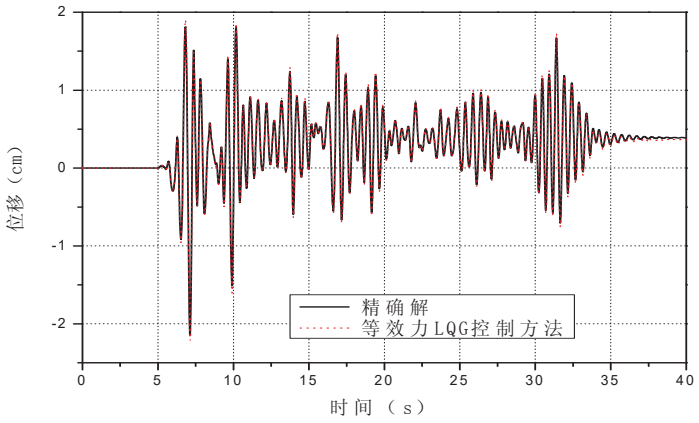


图3-35 地震作用位移反应仿真结果

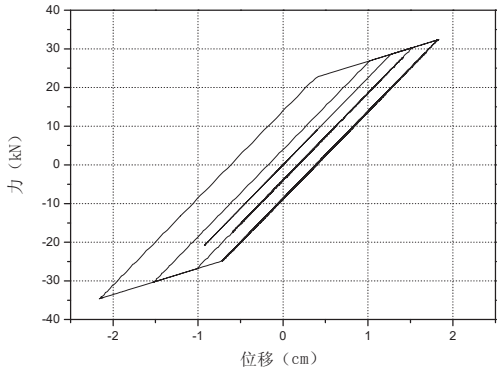


图3-36 等效力控制方法回复力与位移关系

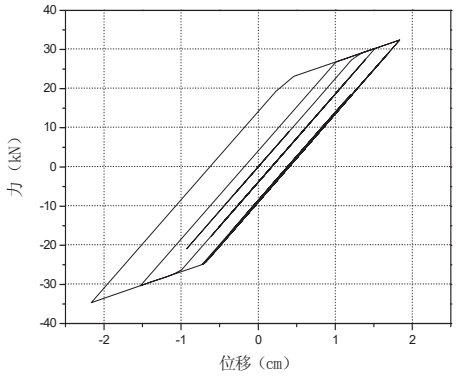


图3-37 精确解回复力与位移关系

结构进入屈服阶段后，其刚度可能变成负值，取 α 为-0.3，其他结构参数取值同上例。这种类型结构的位移响应及力与位移的关系如图 3-38、图 3-39 及图 3-40 所示，说明等效力 LQG 控制方法对非线性有较好的控制效果，能够与精确解有较好吻合。

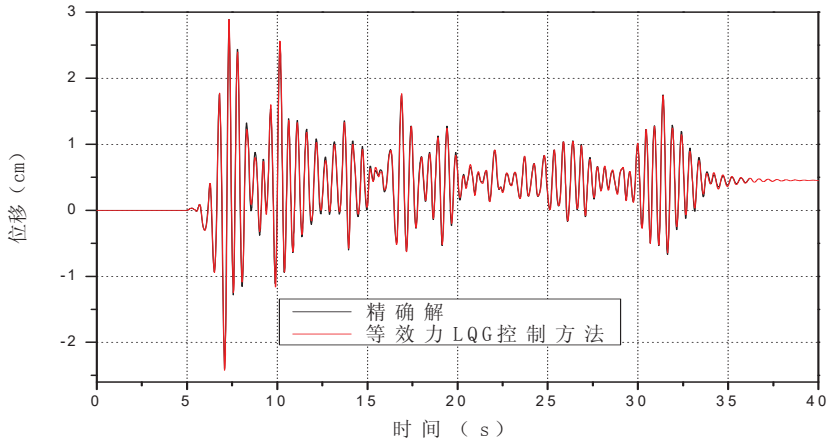


图3-38 地震作用位移反应仿真结果

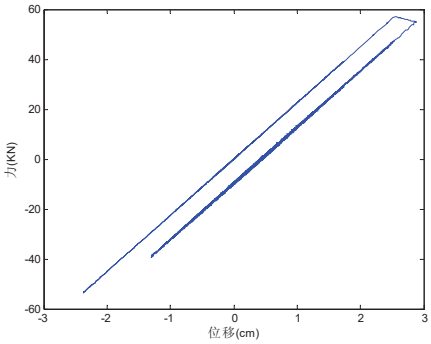


图3-39 等效力控制方法回复力与位移关系

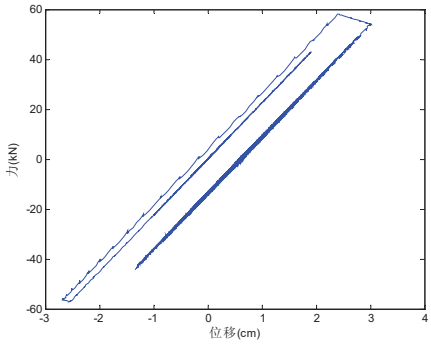


图3-40 精确解回复力与位移关系

3.4 本章小结

实时子结构等效力控制方法是通过反馈控制的原理代替隐式积分算法所需要的反复迭代过程，采用等效力方法的实时子结构试验等效力控制器的设计是该方法的核心。本章针对试验子结构为线性、非线性位移相关型试件的实时子结构试验等效力控制方法进行数值仿真分析，得到结论如下：

（1）通过应用非线性电液伺服加载系统建立的等效力控制系统模型的数值仿真发现，当试验子结构为位移相关型试件时，等效力 P 控制方法得到的试验子结构位移响应有较大抖动，而等效力 PI 控制器能够较好地解决这个问题，同时发现，增大积分增益有消除位移响应时滞的作用。

（2）本章提出了位移相关型子结构试验的等效力 LQG 控制方法。数值仿真结果表明，权矩阵中误差项权系数增大有助于加快试验子结构位移反应，减少时滞。

第4章 速度相关型试件的等效力控制方法

4.1 引言

本文第三章介绍了位移相关型试件的实时子结构试验等效力方法。在实际的工程实践中还有很多速度相关型结构，在工程应用前需要验证其性能，因此实时子结构试验仍需考虑速度相关型结构。速度相关型结构性能的检验不仅需要在一个积分步长内实现目标位移，而且需要实现目标速度。本章将利用第二章建立的非线性等效力控制系统，分别讨论使用等效力 PID 控制系统和等效力 LQG 控制系统的实时子结构试验进行速度相关型结构的子结构试验仿真。

4.2 速度相关型子结构试验的 PID 等效力控制系统

4.2.1 PID 等效力控制系统数值仿真分析

以阻尼器为试验子结构，研究电液伺服加载系统对斜坡位移命令的响应。电液伺服加载系统的参数如本文 2.3 节所述。结构总刚度K取 569.25kN/m，阻尼比为 0.05，阻尼系数C取 18.622kN·s/m，积分时间步长Δt取 0.01 秒，等效力控制系统采样时间间隔 0.001 秒。取数值子结构的质量M_N为 1.44×10^4kg, 数值子结构阻尼C_N系数取 8.816kN·s/m，试验子结构质量M_E取零，试验子结构阻尼系数C_E取 8.806 kN·s/m，试验子结构刚度K_E取零。等效力控制系统原理框图如图 3-1、图 3-2 所示。向电液伺服系统发送斜率为 0.01m/s的斜坡命令，电液伺服系统的位移响应如图 4-1 所示，速度响应如图 4-2 所示。可以看到，位移响应能够平稳跟踪位移命令，而速度响应则有较大波动。

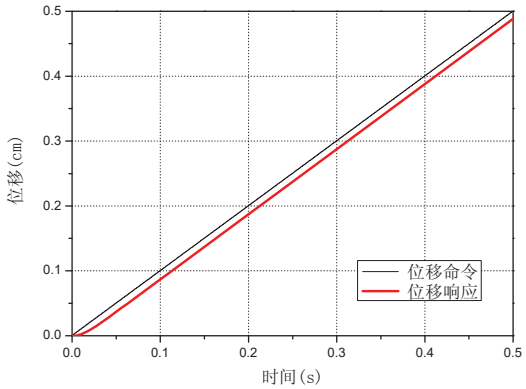


图4-1 电液伺服加载系统对斜坡位移命令的位移响应

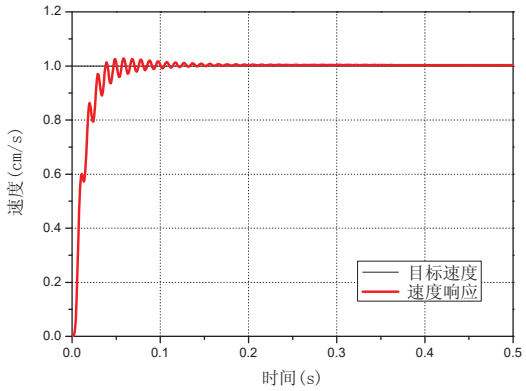
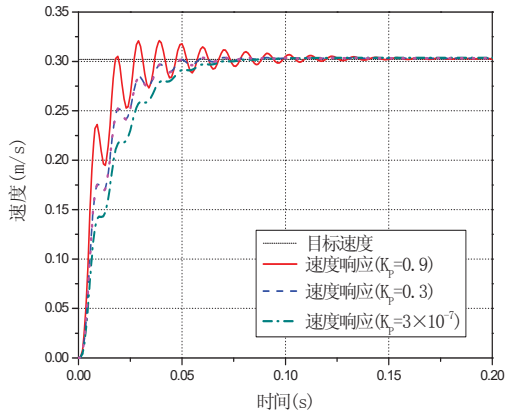


图4-2 电液伺服加载系统对斜坡位移命令的速度响应

本章中的等效力斜坡命令的斜率均为 1000000N/s；多步线性插值命令为幅值为 10000N并在积分步长内线性插值的正弦命令。首先，考察等效力P控制器中比例增益对速度响应的影响，仿真所用参数与本小节上述算例相同。取积分增益和微分增益取为零，变化比例增益对速度响应影响如图 4-3、4-4 所示。增大比例增益可以使速度响应加快，但当K_P过大时速度响应出现抖动，而K_P很小时速度响应与目标速度存在时滞。



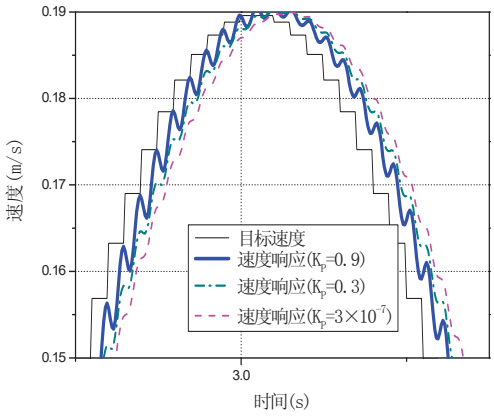
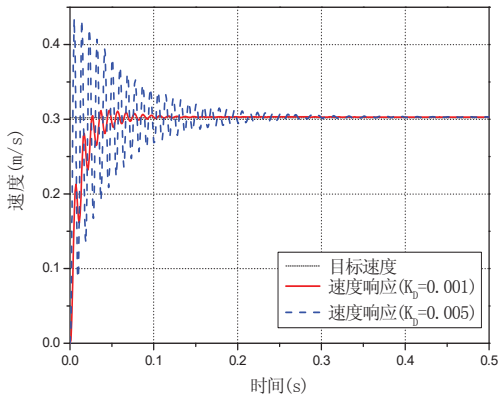


图4-3 比例增益对斜坡命令速度响应影响 图4-4 比例增益对正弦命令速度响应影响

其次，向比例增益中加入微分增益，考察微分增益对速度响应的影响。取比例增益为 0.3，积分增益取零，观察微分增益的变化对速度响应的影响。通过图 4-5、图 4-6 可以看到微分增益会使结构产生较大震荡，因此不宜使用。



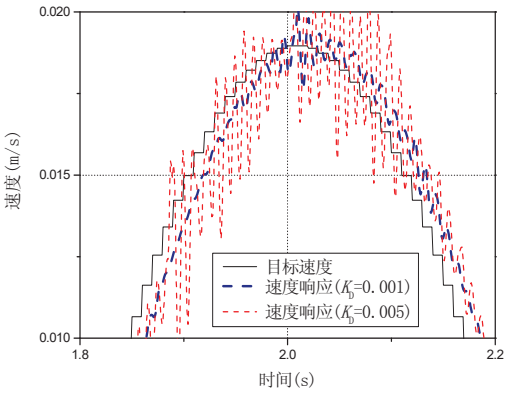
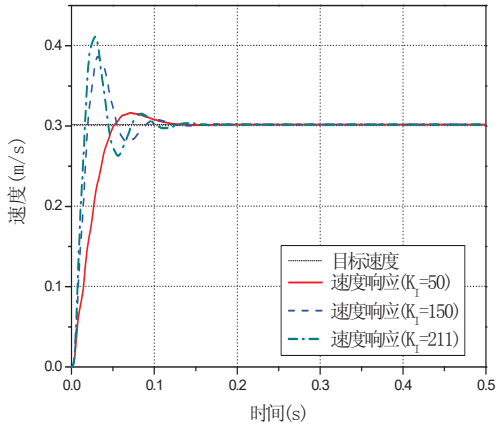


图4-5 微分增益对斜坡命令速度响应影响 图4-6 微分增益对正弦命令速度响应影响

当加入积分模块时，取等效力控制器比例增益为 0.3，微分增益为 0，通过图 4-7、4-8 考察积分增益变化对速度响应的影响，等效力命令线性插值发送。积分增益过大时，如K_I=150 时，单步斜坡等效力命令的速度响应出现超调，但增大的积分增益加快了多步等效力命令的速度响应，减少了时滞，如图 4-8 所示。从图 4-7 中可以看到，等效力控制系统的速度响应并不是在 0.1s的时候测量速度才接近真实速度，而从图 4-8 所示，当K_I=50 时，

动态时滞仅有 0.01s左右，且增大积分增益可以减小动态时滞。



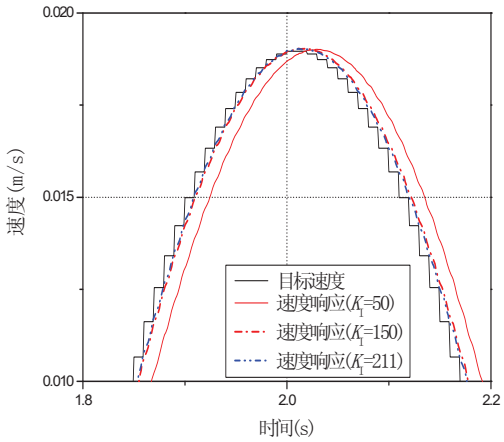
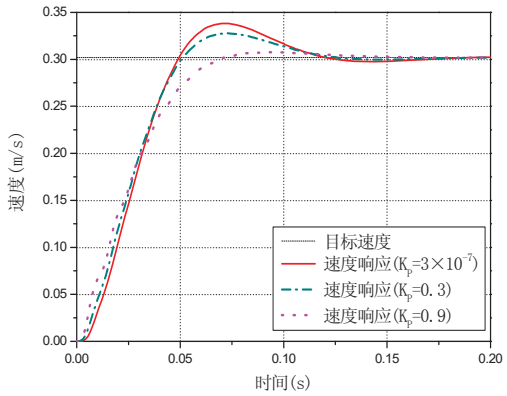


图4-7 积分增益对斜坡命令速度响应影响 图4-8 积分增益对正弦命令速度响应影响

在等效力 PI 控制器中，改变比例增益对速度响应的影响如图 4-14 所示。在 PI 控制器中。比例增益的增大对速度响应加快不明显，当比例增益过大时多步等效力命令的速度响应出现震荡。



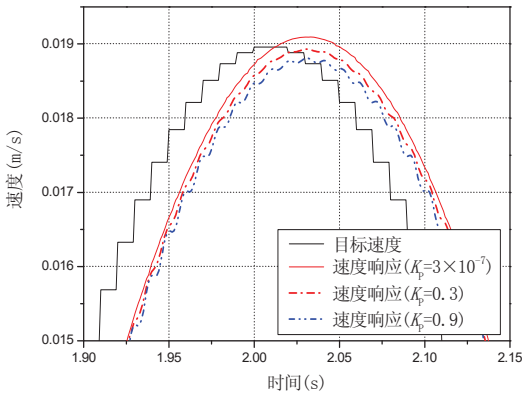
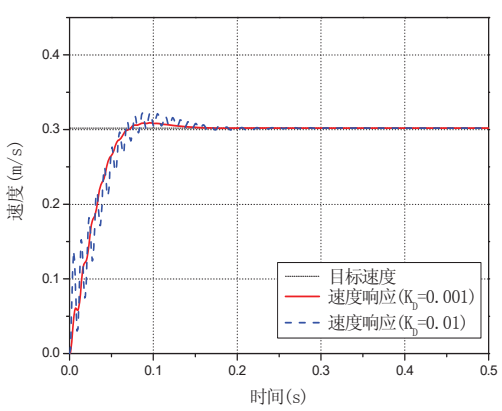


图4-9 比例增益对斜坡命令速度响应影响 图4-10 比例增益对正弦命令速度响应影响

如果向 PI 控制器中加入微分增益，微分增益取值很小时对速度响应没有影响，随着微分增益增加速度响应震荡逐渐剧烈，速度响应如图 4-11 所示，比例增益取 0.3，积分增益取 50。因此宜选用等效力 PI 控制器对等效力控制系统进行控制。



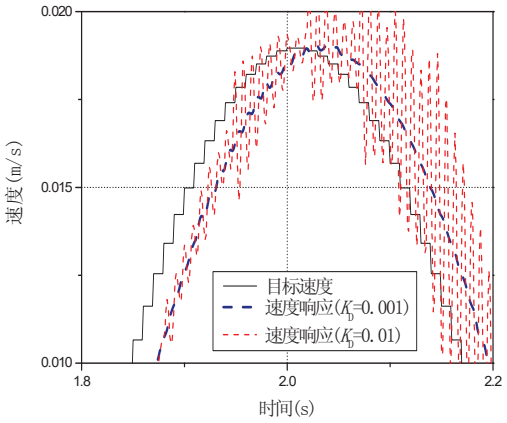


图4-11 微分增益对斜坡命令速度响应影响 图4-12 微分增益对正弦命令速度响应影响

4.2.2 实时子结构试验数值仿真分析

在试验子结构为速度相关型结构的实时子结构试验中，等效力命令进行线性插值能够保证等效力控制系统中测得的回复力更真实地反映实际结构中回复力。结构自由振动时的实时子结构试验位移仿真如图 4-13 所示、速度响应如图 4-14 所示，结构参数与 4.2.1 节中算例相同。当等效力进行一次插值时，可以看到测量速度与数值求解得到的速度响应吻合很好。

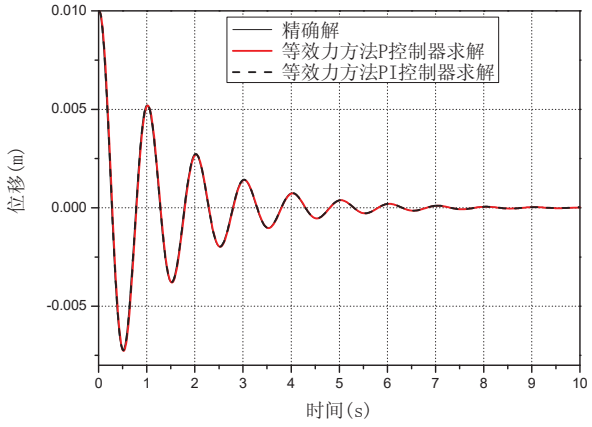
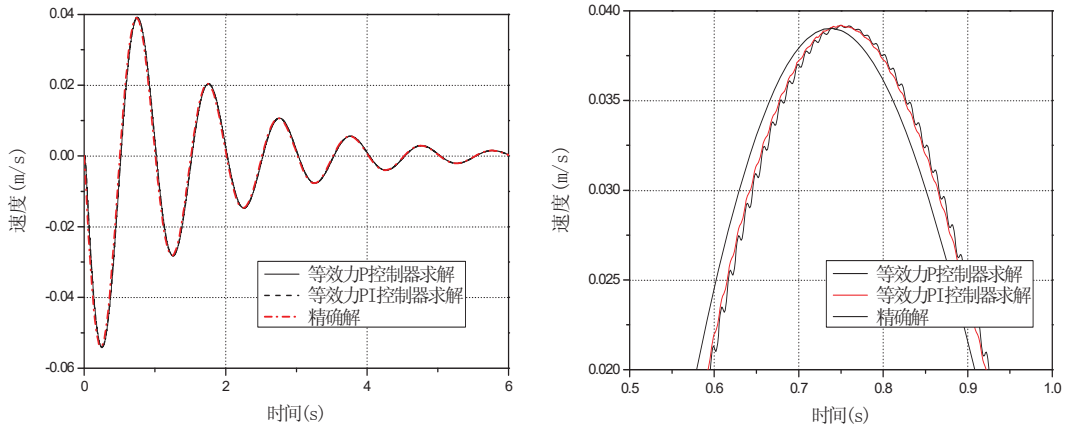


图4-13 自由振动位移响应



a) 全局图　　b) 局部图

图4-14　P 控制器、PI 控制器的自由振动速度仿真结果

结构在受到地震作用的实时子结构试验仿真中，位移响应如图 4-15 所示，速度响应如图 4-16 所示。结构参数与 4.2.1 节中算例相同，等效力 P 控制器和 PI 控制器的比例增益均取 0.3，PI 控制器的微分增益取 150。对于试验子结构是阻尼试件的实时子结构试验，从图 4-15 中可以看到，尽管位移响应都可以和精确解较好吻合，但从图 4-16 中可以看到 PI 控制器的数值仿真效果比等效力 P 控制器的仿真效果要好， PI 控制器中速度值不会发生较大波动，而使用 P 控制器时速度响应值会发生波动。对于试验子结构为速度相关型试件的实时子结构试验宜采用 PI 控制器对等效力进行控制。

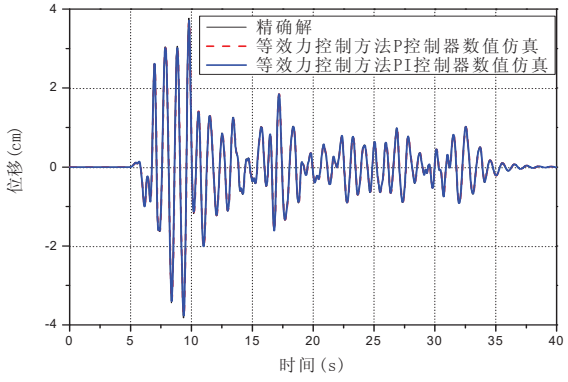
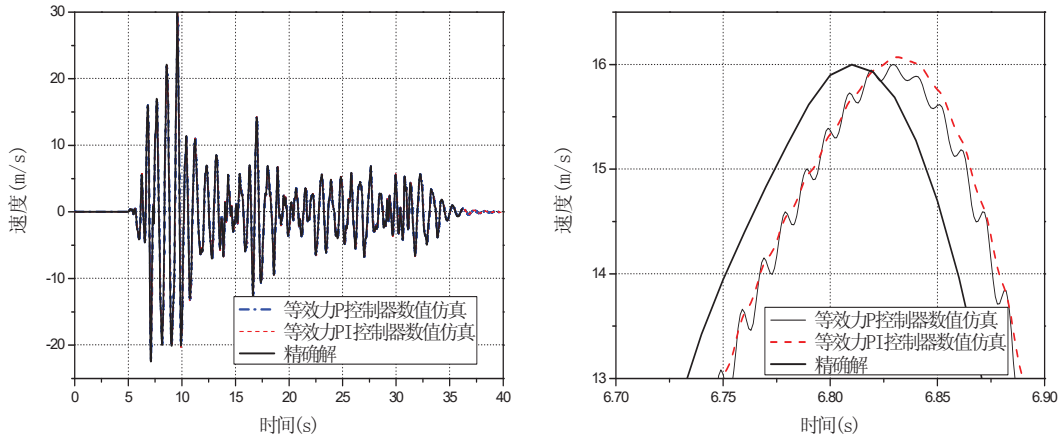


图4-15 地震作用位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

图4-16 地震作用速度反应仿真结果

当阻尼试件为非线性试件时，回复力 R(v)取值根据文献[65]中所述，典型的非线性阻尼力模型为指数型阻尼力模型，可以表示成如式(4-1)中所示的形式。

$$R(v)=C_{\theta}\mathrm{sign}(v)|v|^{\theta} \tag{4-1}$$

式中C_{θ}是根据试验测量的常数，θ通常取值为 0.35~1.0 之间的一个正数，本文中取 0.5，sign 为符号函数。数值子结构阻尼为线性，取C_{N}为 8.816kN·s/m，试验子结构阻尼为非线性，取C_{θ}为 9.806kN·(s/m)$^{\theta}$，其他参数同 4.2.1 节算例所用参数。等效力PI控制器比例增益取 0.3，积分增益取 211，等效力P控制比例增益取值为 0.3。

应用等效力P控制器控制进行实时子结构数值仿真位移响应如图 4-17所示、速度响应如图 4-18 所示，速度与阻尼力关系如 4-19 所示。采用等效力PI控制器时，位移响应如图 4-20 所示、速度响应如图 4-21 所示，速度与阻尼力关系如 4-22 所示。

当采用 P 控制器时，尽管图 4-17 中位移响应与精确解吻合较好，但是通过图 4-18 可以看到速度依然存在抖动现象，与精确解不能很好的吻合。图 4-19 可以看出，虽然阻尼力比较小，但是能够说明阻尼力与速度的非线性关系。而从图 4-20、4-21 可以看出，使用 PI 控制器时位移响应与精确解吻合较好，且会得到比较平稳的速度，速度响应和精确解也能够较好吻合。

从图 4-22 中可以看出阻尼力与速度的非线性关系。实时子结构试验中抖动的结果将会为试验者带来错误信息，使试验者误以为抖动的主要原因是试验子结构的动力特性，而抖动的原因是等效力控制系统的性能问题。因此在试验子结构为非线性速度相关型试件的实时子结构等效力控制方法中，PI 器控制比 P 器控制效果好。

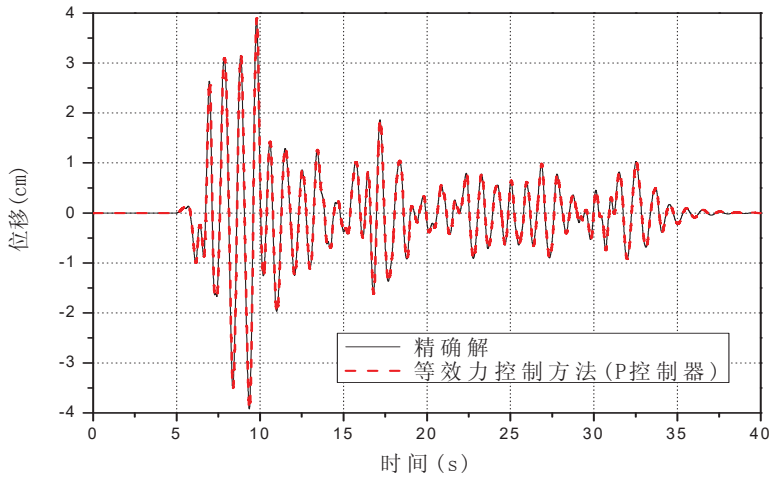
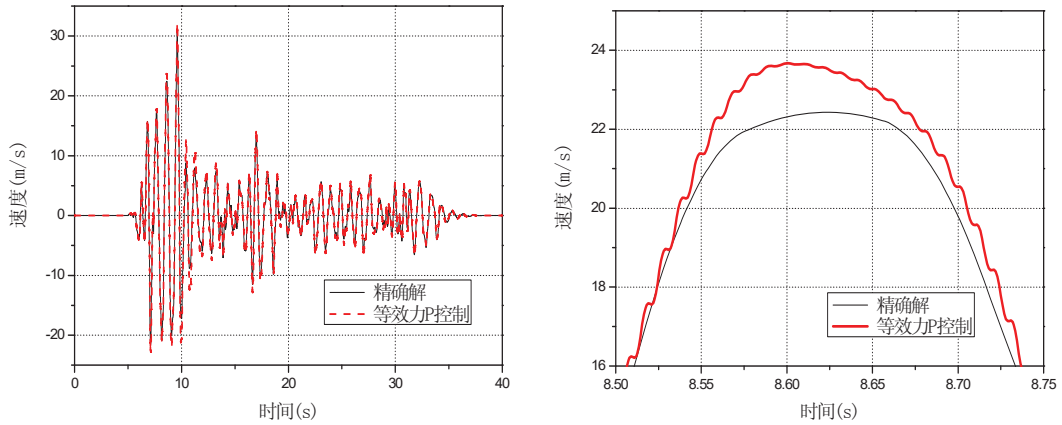


图4-17 地震作用的位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

图4-18 地震作用的速度反应仿真结果

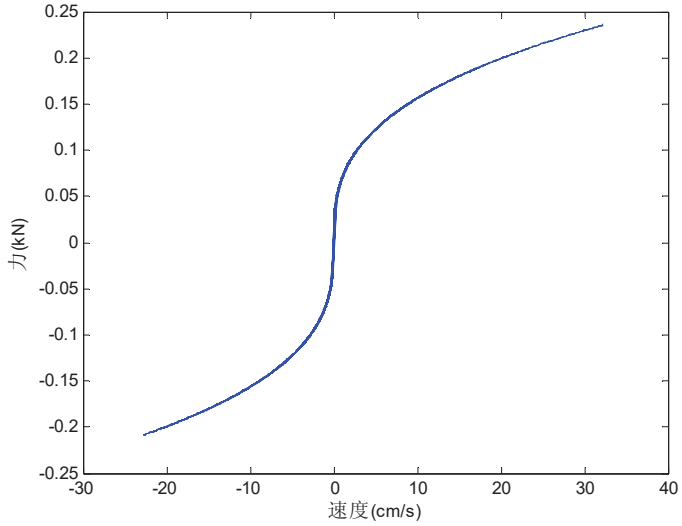


图4-19 非线性阻尼试件速度与阻尼力关系

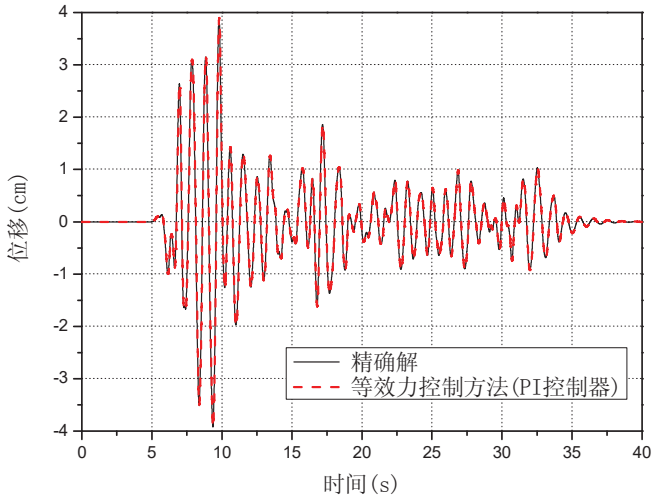
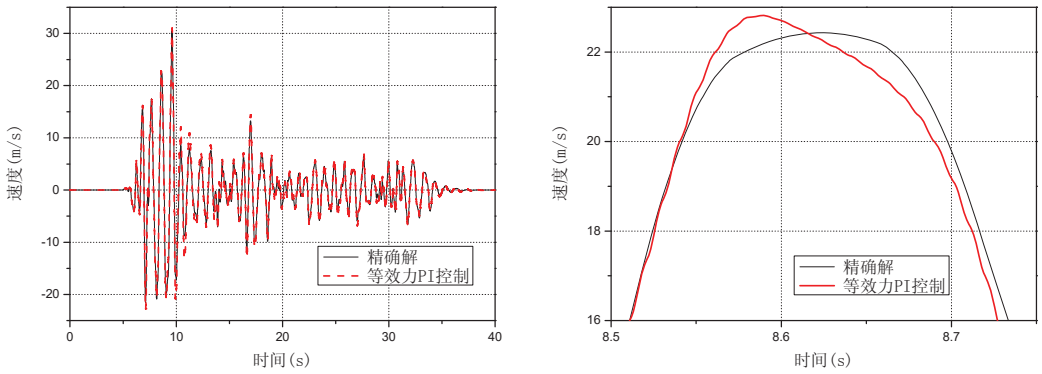


图4-20 非线性阻尼试件地震作用下的位移响应



a) 全局图　　b) 局部图

图4-21 非线性阻尼试件地震作用下的速度反应

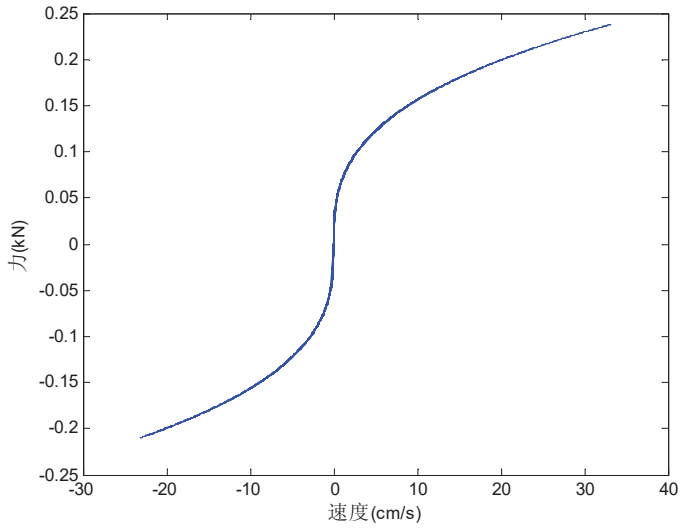


图4-22 非线性阻尼试件速度与阻尼力关系

4.3 等效力的状态反馈控制

4.3.1 等效力 LQG 控制器设计

本文 2.5 节介绍的等效力 LQG 控制方法是针对质量-弹簧-阻尼试验子结构进行设计的，3.3.1 节介绍的等效力 LQG 控制方法是针对位移相关型试件

进行设计的，对于速度相关型试验子结构，试件的质量和刚度都忽略不计，系统状态方程发生变化，权矩阵的维数发生变化了，因此前面的方法不适用于速度相关型试验子结构的实时子结构等效力控制方法。本节提出速度相关型试件等效力控制 LQG 方法，取单自由度结构作为例子进行研究。结构参数与 4.2.1 节相同。等效力控制系统控制对象的状态方程为五阶的，控制对象传递函数为：

$$T(s)=C_{\mathrm{F}}T_{\mathrm{A}}(s)(K_{\mathrm{N}}+K_{\mathrm{PD}}+C_{\mathrm{E}}s) \tag{4-2}$$

取权矩阵 **Q** 为六阶，**Q** 的取法与 3.3.1 介绍方法相似，权矩阵 **Q** 可表示为：

$$Q=\alpha\cdot\begin{bmatrix}\lambda Q_{11} & & & & & \\ & Q_{22} & & & & \\ & & Q_{33} & & & \\ & & & Q_{44} & & \\ & & & & Q_{55} & \\ & & & & & Q_{66}\end{bmatrix} \tag{4-3}$$

Q_{11}为误差项权系数，Q_{22}为等效力四阶导数对应权系数$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^4$，$Q_{33}$为等效力三阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^3$，$Q_{44}$为等效力二阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}\cdot\Delta t^2$，$Q_{55}$为等效力一阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}\Delta t$，$Q_{66}$为等效力一阶导数对应权系数，取$C_{\mathrm{F}}$。R取为$\beta\cdot C_{\mathrm{F}}$。当$\alpha$和$\beta$比值一定时，通过改变λ调节等效力响应。本文取$\alpha$为 1 ，$\beta$为 1×10^{-3}。

首先通过状态方程求得状态反馈增益**K**，即[K_1 $\mathbf{K}_2$]，而后对状态向量进行估计。通过Mablab命令lqe2(**A**,**D**,**C**,$\mathbf{Q_e}$,$\mathbf{R_e}$)计算观测器增益，其中$\mathbf{Q_e}$取0.001，$\mathbf{R_e}$取为 0.01**I**，由于本文中仅等效力为已知量，因此取$\mathbf{R_e}$为一维矩阵。

4.3.2 LQG 等效力控制系统数值仿真分析

数取值方法同 4.2.1 节中介绍的 λ 的计算方法。通过图 4-23 可以看到 λ 对斜坡等效力命令的速度响应的影响，当 λ 过大会引起速度响应的超调。但在多步斜坡命令的响应中，适当增大 λ 能够加快速度响应，减少时滞，没有超调，如图 4-24 所示。

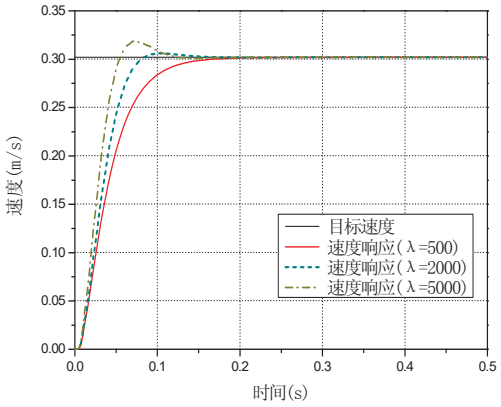


图4-23 λ 对斜坡命令速度响应的影响

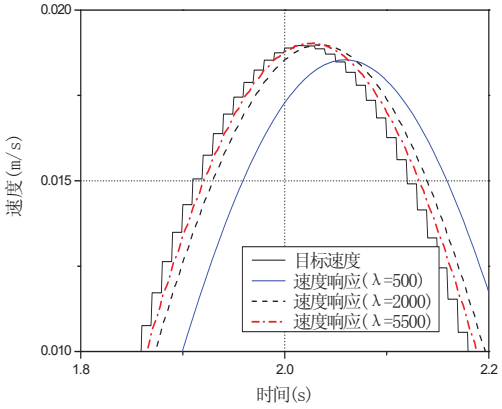


图4-24 λ 对正弦命令速度响应的影响

当试验子结构为非线性阻尼试件时，结构参数取 4.2.2 节中算例，速度与阻尼力的关系如式(4-1)所示。采用 LQG 算法对等效力系统进行控制，LQG 控制参数选取时认为试验子结构阻尼为线性，试验子结构阻尼取为 C_θ，取 λ 为 500。等效力控制系统对斜坡命令的等效力响应如图 4-25 所示，试验子结构速度响应如图 4-26 所示。通过图 4-25、4-26 可以看到，对于非线性阻尼试件，λ 取值对等效力斜坡命令的响应与试验子结构为线性阻尼试件时相似，这里不再进行讨论。

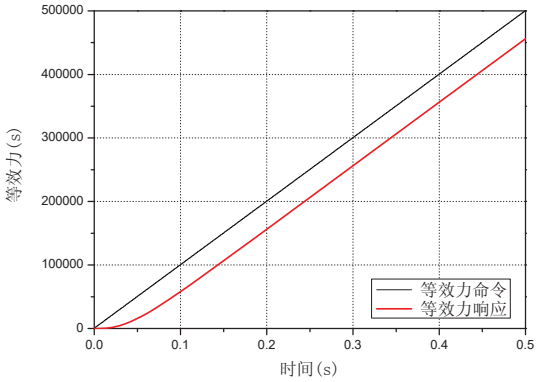


图4-25 等效力斜坡命令的等效力响应

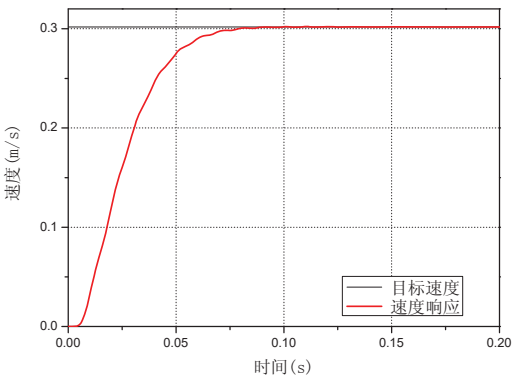


图4-26 等效力斜坡命令的速度响应

4.3.3 实时子结构试验数值仿真分析

在有阻尼结构的自由振动中，因为结构阻尼可以抵消一部分时滞引起的负阻尼作用，所以即使存在时滞位移响应也不会发散，但自由振动位移幅值因为阻尼的减小而增大。λ 变化时得到的自由振动位移时程曲线如图 4-27 所示，速度响应如图 4-28 所示。当 λ 较小时，位移幅值偏离精确解较大，速度响应慢，当 λ 较大时，位移幅值偏离精确解较小，速度响应较快。因此，选取 λ 时应选取与数值计算速度最接近的那条曲线的 λ 值。

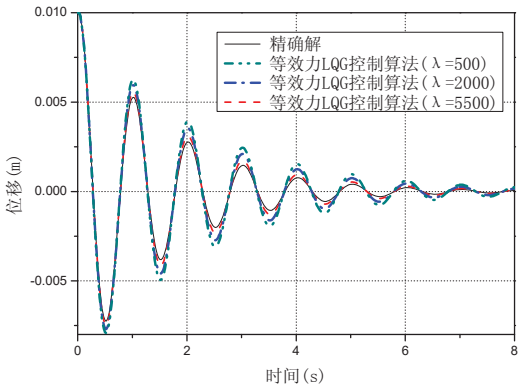
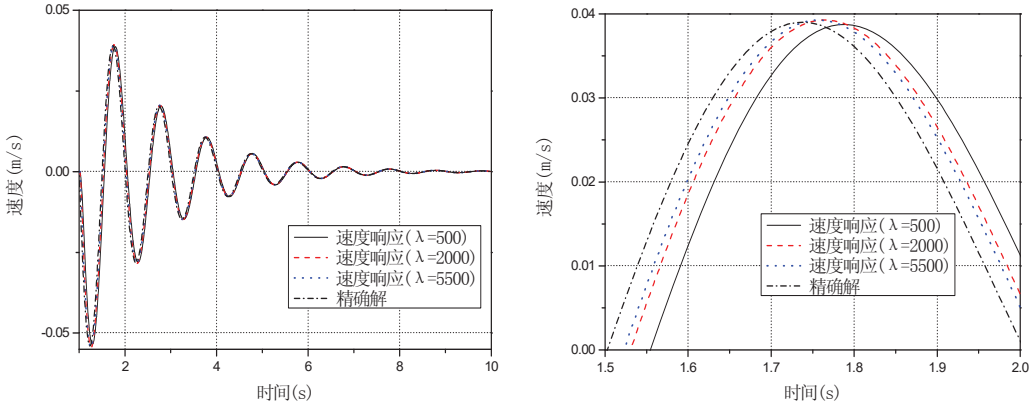


图4-27 λ 对自由振动速度响应的影响



a) 全局图　　b) 局部图

图4-28 λ 对自由振动速度响应的影响

结构在受迫振动的实时子结构试验仿真中，结构参数和等效力 LQG 控

制参数与有阻尼结构自由振动的算例相同，位移响应如图 4-29 所示，速度响应如图 4-30 所示。等效力 LQG 控制器对试验子结构为线性阻尼试件的实时子结构试验能够进行较好的估计和控制，得到的位移反应仿真结果和速度反应仿真结果与精确解吻合较好。

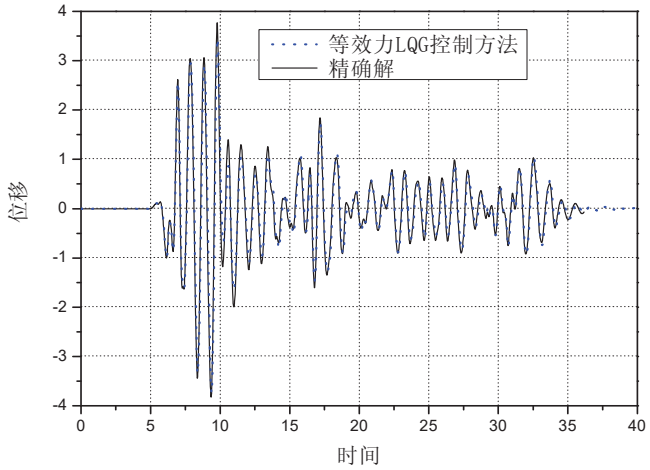
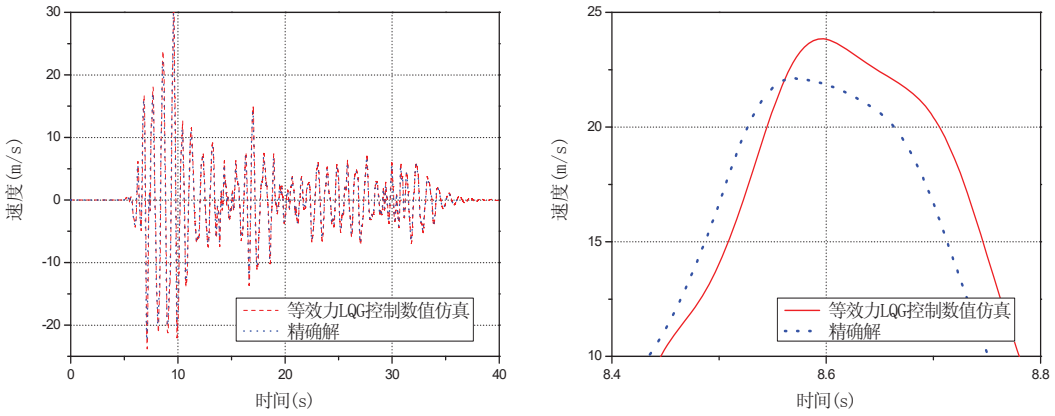


图4-29 地震作用位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

图4-30 地震作用速度反应仿真结果

本小节应用等效力 LQG 控制方法对试验子结构为非线性阻尼试件的实时子结构试验进行数值仿真，结构参数取值与 4.2.2 节非线性阻尼算例所用

参数相同。等效力 LQG 控制方法所用参数同 4.3.2 节非线性阻尼试件算例。结构在地震作用下的位移反应如图 4-31 所示、速度响应如图 4-32 所示。阻尼力与速度关系如图 4-33 所示。

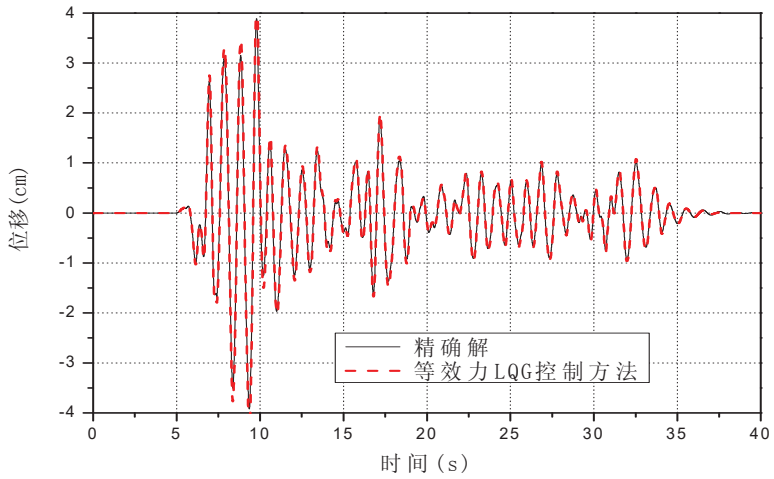
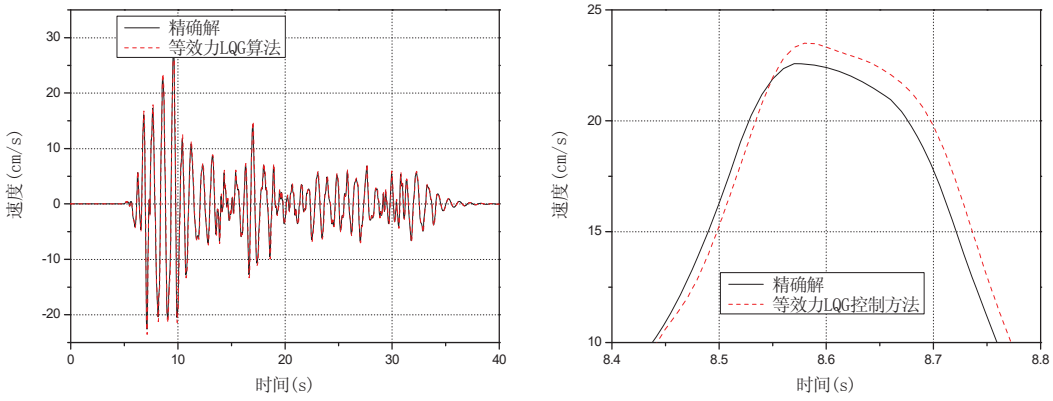


图4-31 地震作用位移反应仿真结果



a) 全局图　　b) 局部图

图4-32 地震作用速度反应仿真结果

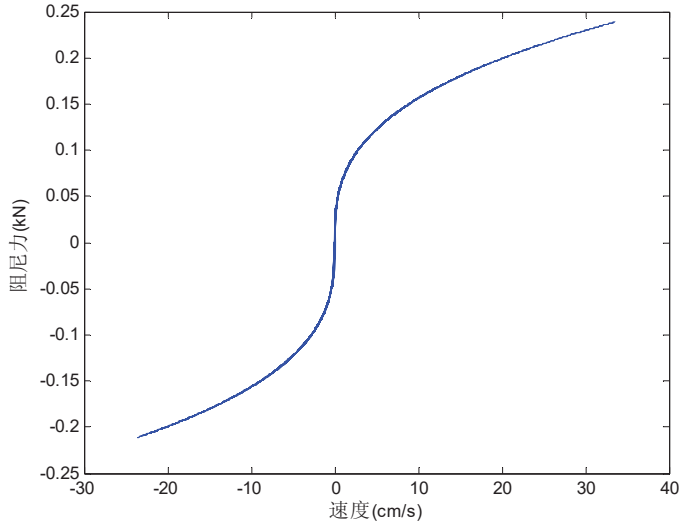


图4-33 非线性阻尼试件速度与阻尼力关系

通过图 4-31、4-32、4-33 可以看出，当阻尼试件的阻尼力与速度的关系为非线性时，采用等效力 LQG 控制方法对实时子结构试验进行数值仿真，所得到的结果与精确解吻合较好，能够对等效力控制系统进行很好的控制，对状态向量进行很好的估计。通过数值仿真分析发现，等效力 LQG 控制方法能够较好的进行一些试验子结构为非线性试件的实时子结构试验。

4.4 本章小结

本章进行了试验子结构为线性、非线性速度相关型试件的实时子结构试验等效力方法数值仿真，得到结论如下：

（1）通过应用非线性电液伺服加载系统建立的等效力控制系统模型的数值仿真发现，当试验子结构为速度相关型试件时，与试验子结构为位移相关型试件的实时子结构试验类似，等效力 P 控制方法得到的速度响应有较大波动，而等效力 PI 控制器能够很好解决速度抖动的问题。

（2）提出了速度相关型子结构试验的等效力 LQG 控制方法。仿真表明，增大权矩阵的误差项系数可以加快速度相关型试验子结构的速度响应，减少了速度响应的时滞。选取合适的权矩阵参数，等效力控制系统的 LQG 控制算法能够很好的对等效力控制系统进行控制。

结论

实时子结构试验是将数值结构计算与试验结构实时加载相结合的一种新型抗震试验方法。本文应用非线性电液伺服作动器的数值模型对位移相关型试件和速度相关型试件的实时子结构试验进行研究，得到如下结论：

1. 考虑了电液伺服作动器的高阶特性、非线性特性及试验子结构动力特性对试验的结果影响，建立了实时子结构试验等效力控制方法的 Simulink 数值仿真模型。

2. 对试验子结构为位移相关型试件的实时子结构试验进行了数值仿真，仿真结果表明，等效力 P 控制器的得到的位移反应存在抖动，等效力 PI 控制器和 LQG 控制器能够避免这个现象。

3. 当试验子结构为速度相关型试件时，与位移相关型子结构试验类似，等效力 P 控制器得到的速度反应有抖动现象，而等效力 PI 控制器和 LQG 控制器能够有效地对等效力系统进行控制，避免了速度抖动的现象。

本文虽然做了以上一些工作，但是还存在一些问题需要做进一步的研究和探索，主要包括：

1. 本文中的数值子结构为线性，而在实际试验过程中数值子结构可能为非线性结构。因此，数值子结构的非线性对试验效果的影响和对计算效率的影响值得进一步研究。

2. 本文仅进行了单自由度 LQG 控制方法数值仿真，有待于进一步进行多自由度数值仿真分析。

3. 本文针对位移相关型试件和速度相关型试件设计的实时子结构试验等效力 LQG 控制方法有待于进一步试验验证。

参考文献

1 胡聿贤. 地震工程学. 地震出版社, 2006

2 沈聚敏，周锡元, 高小旺. 抗震工程学，中国建筑工业出版社, 2000

3 M. Nakashima, H. Kato and E. Takaoka. Development of Real-time Pseudodynamic Testing. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1992, 21(1): 79~92

4 M. Hakuno, M. Shidowara and T. Hara. Dynamic Destructive Test of a Cantilevers Beam Controlled by an Analog-Computer. Transaction of the Japan Society of Civil Engineering. 1969, No. 171

5 K. Takanashi. Seismic failure analysis of structures by Computer-Pulsator On-line System. Journal of the Institute Science. 1974, 26(11):13~25

6 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震实验方法. 科学出版社, 2000

7 李忠献. 工程理论试验与技术. 天津大学出版社, 2004

8 王倩颖. 实时子结构试验方法及其应用. 哈尔并工业大学博士学位论文, 2007 年 7 月

9 田石柱, 赵桐. 抗震拟动力实验技术研究. 世界地震工程, 2001, 17(4): 60~66

10 S. Y. Chang. Explicit Pseudodynamic Algorithm with Unconditional Stability. Journal of Engineering Mechanics. 2002, 128(9): 935-947

11 A. V. Pinto, P. Pegon. Pseudo-dynamic Testing of Bridges Using Non-linear Substructuring. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2004, 33: 1125-1146

12 M. Yokouchi, K. Kitajima. Pseudo-dynamic Test on an Existing R/C School Building (Verification Test of Response Control Retrofit Effect). Proceedings of the First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering. Nagoya, Japan, 2005: 235~242

13 K. Tsai, P. Hsiao. Pseudo-dynamic Test of a Full-scale CFT/BRB Frame—Part II: Seismic Performance of Buckling-restrained Braces and Connections. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37 (1): 1099~1115

14 J. Pauschke, T. L. Anderson, S. N. Goldstein and P. Nelson. Construction status of the George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering

Simulation. Proceedings of 7NCEE. Boston, MA. 2002

15 P. Pan, T. Motohid and N. Masagoshinl. Online Hybrid Test by Internet Linkage of Distributed Test-Analysis Domains. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34 (1):1407~1425

16 吕建民，郭玉荣，肖岩. 结构远程协同试验研究进展. 建筑科学与工程学报, 2006,23(4): 38~43

17 国家自然科学基金重大研究计划. 重大工程的动力灾变. http://deci.dlut.edu.cn/xmjj_content.asp?id=42, 2008

18 T. Horiuchi, M. Inoue, T. Konno and Y. Namita. Real-time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation and Its Application to a Piping System with Energy Absorber. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 1121~1141

19 A. P. Darby, A. Blakeborough and M. S. Williams. Real-time Substructure Tests Using Hydraulic Actuator. Journal of Engineering Mechanics. 1999, 125: 1133~1139

20 M. Nakashima, N. Masaoka. Real-time On-line Test for Mdof Systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1999, 28: 393~420

21 T. Horiuchi, M. Inoue and T. Konno. Development of a Real-time Hybrid Experimental System Using a Shaking Table. Proc. 12th World Conf. Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000, Paper No.0843

22 J. P. Conte, T. L. Trombetti. Linear Dynamic Modeling of a Uni-axial Servo hydraulic Shaking Table System. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2000, 29: 1375~1404

23 S. A. Neild, D. P. Stoten, D. Drury and D. J. Wagg. Control issues relating to real-time substructuring experiments using a shaking table. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005; 34: 1171~1192

24 M. S. Williams, A. Blakeborough. Laboratory Testing of Structures under Dynamic Loads: an Introductory Review. Phil Trans R Soc Lond A, 2001, 359: 1651~1669

25 D. M. Williams. Numerical Modeling of Real-Time Substructure Testing. PhD Dissertation, Oxford University, 2001

26 R. Jung, P. B. Shing, E. Stauffer and B. Thoen. Performance of a Real-time Pseudodynamic Test System Considering Nonlinear Structural Response,

Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2007, 36: 1785~1809

27 R. Jung. Development of Real-time Hybrid Test System. PhD Dissertation. University of Colorado. 2005

28 王向英，实时子结构控制方法及数值仿真分析. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2005 年 2 月

29 吴斌, 王向英, 王倩颖. 电液伺服加载系统的滑动模态控制及其在实时子结构试验中的应用. 第四届中国结构控制年会, 大连, 2004

30 刘兴堂. 应用自适应控制. 西北工业大学出版社，2003

31 D. J. Wagg, D. P. Stoten. Substructuring of Dynamical Systems via the Adaptive Minimal Control Synthesis Algorithm. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2001, 30: 865~877

32 邓利霞. 实时子结构实验的自适应控制方法. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2007 年 3 月

33 J. Zhao, S. Carol, F. Catharine and P. Thomas. Nonlinear System Modeling and Velocity Feedback Compensation for Effective Force Testing. Journal of Engineering Mechanics. 2005, 131(3): 244~253

34 S. A. Mahin, P. B. Shing. Pseudodynamic Method for Seismic Testing. Journal of Structural Engineering. 1985, 111, 1482~1503

35 保海娥. 实时子结构实验逐步积分算法的稳定性和精度. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2005 年 1 月

36 B. Wu, H. Bao, J. Ou and S. Tian. Stability and Accuracy Analysis of Central Difference Method for Real-time Substructure Testing. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2005, 34, 705~718

37 吴斌, 保海娥. 实时子结构实验 Chang 算法的稳定性和精度. 地震工程与工程振动. 2006, 26(2), 41~48

38 B. Wu, H. Bao. Stability Analysis of Central Difference Method for Real-time Substructure Testing of SDOF and MDOF Structure. Proceedings of the Third International Conference on Earthquake Engineering. Nanjing, 2004: 19~20, China

39 杨现东. 振动台子结构试验的数值仿真分析. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2005 年 1 月

40 许国山. 实时子结构实验算子分解法的数值性能研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2005 年 1 月

41 B. Wu, G. Xu, Q. Wang and M. S. Williams. Operator-splitting Method for Real-time Substructure Testing. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2006, 35(3): 293~314

42 B. Wu, G. Xu. Numerical behavior of operator-splitting method for real-time substructure testing. The First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan, 2005

43 B. Wu, Q. Wang and J. Ou. Stability Analysis of Operator-Splitting Method for Real-time Substructure Testing with Actuator Delay and Compensation. The Eighth US National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, 2006, 18~22, Paper No.135

44 李进, 王焕定, 张永山, 赵桂峰. 高阶单步实时动力子结构实验技术研究. 地震工程与工程振动. 2005, 25 (1): 97~101

45 H. M. Hilber, T. J. R. Hughes and R. L. Taylor. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1977, 5(3), 283~292

46 P. B. Shing, Z. Wei, R. June and E. Stauffer. NEES Fast Hybrid Test System at the University of Colorado. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004; Paper No. 3497

47 B. Wu, Q. Wang, P. B. Shing and J. Ou. Equivalent Force Control Method for Generalized Real-time Substructure Testing with Implicite Integration. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2007(9), 36: 1127~1149

48 冯涛. 实时子结构试验的无超调等效力控制方法. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2007 年 7 月

49 李研. 防屈曲支撑的抗震性能及子结构试验方法. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2007 年 10 月

50 许国山，吴斌. 弹性试件的实时子结构试验等效力控制方法. 沈阳建筑大学学报(已录用)

51 王贞. 考虑试件质量的实时子结构试验等效力控制方法. 第二届结构工程新进展国际论坛(已录用)

52 黄浩华. 电液伺服系统在地震工程研究中的应用. 测控技术. 1995, 15(4): 32~36

53 T. Horiuchi, T. Konno. A New Method for Compensating Actuator Delay in Real-time Hybrid Experiments. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2001, 359:

1893~1909
54 王倩颖, 吴斌, 欧进萍. 实时子结构实验的研究与应用. 世界地震工程. 2008, 24(1), 40~46
55 张举中. 电动伺服加载系统控制方法研究. 西北工业大学硕士学位论文. 2007 年 5 月
56 王占林.近代电气液压伺服控制. 北京航空航天大学出版社，2005
57 李运华，王占林，王孙安，史维祥. 液压伺服系统的非线性控制. 机械工程学报. 1995, 31(5), 116~121
58 D. M. Williams, M. S. Williams and A. Blakeborough. Numerical Modeling of a Servo-hydraulic Testing System for Structures. Journal of Engineering Mechanics. 2001, 127(8): 816~827
59 R. June, P. B. Shing. Performance Evaluation of a Real-time Pseudodynamic Test System. Earthquake Engineering and Structure Dynamics. 2006, 789~810
60 韩俊伟，聂伯勋，于丽明，韩雅萍. 带压差反馈的电液伺服系统三参数自应控制器设计. 1997, 29(6), 66-68
61 王晓婷. 电液伺服系统的非线性控制. 西北工业大学硕士学位论文. 2003 年 12 月
62 孙庆华. 电液伺服系统的非线性控制. 西北工业大学硕士学位论文. 2001 年 10 月
63 王倩颖, 吴斌, 欧进萍. 考虑作动器时滞及其补偿的实时子结构实验稳定性分析. 工程力学. 2007, 24(2), 9~14
64 罗晓玉，林晓，胡庆超. 电液伺服系统中压力反馈补偿的研究. 液压与气动. 1991, 3, 19~21
65 K. Ogara. 现代控制工程. 卢伯英，于海勋等译. 电子工业出版社，2003
66 R. C. Dorf and R. H. Bisho. 现代控制系统（第八版），高等教育出版社
67 胡贞，李明秋. 控制工程基础. 国防工业出版社, 2006
68 李妍. 防屈曲支撑的抗震性能及子结构试验方法. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2007 年 10 月

攻读学位期间发表的学术论文

1. 丁勇，吴斌. 考虑作动器特性的实时子结构试验等效力控制方法. 第二届结构工程新进展国际论坛，中国大连，2008(已录用)

哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《考虑作动器特性的实时子结构试验等效力控制方法》，是本人在导师的指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字　　日期：　　年　　月　　日

哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《考虑作动器特性的实时子结构试验等效力控制方法》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文，可以公布论文的全部内容或部分内容。

作者签名：　　日期：　　年　　月　　日

导师签名：　　日期：　　年　　月　　日

哈尔滨工业大学硕士学位涉密论文管理

根据《哈尔滨工业大学关于国家涉密载体保密管理的规定》，毕业论文答辩必须由导师进行保密初审，外寄论文由科研处复审。涉密毕业论文，由学生按学校规定的统一程序在导师指导下填报密级和保密期限。

本学位论文属于　　保密□，在　　年解密后适用本授权书

不保密□

(请在以上相应的方框内打“√”)

作者签名：　　日期：　　年　　月　　日

导师签名：　　日期：　　年　　月　　日

致谢

衷心感谢我的导师吴斌教授！

吴老师从论文选题到最后的修改都给了我精心的指导和莫大帮助，老师渊博的学识、创新的思维方式都给我留下了深刻的印象，对我的学习、科研起到了至关重要的作用。吴老师严谨的治学态度，使我受益无穷。吴老师在平时的生活和做人处事方面的关心和教导，使我终生难忘。今后我将以更务实、严谨的工作态度回报老师的关心和教导，不辜负老师的厚望！同时我也祝愿吴老师工作顺利、身体健康、家庭和美！

感谢土木工程学院 423 教研室全体师兄弟姐妹提供的融洽的学习环境！

感谢 Shing 教授提供了电液伺服加载系统模型，为我的等效力控制系统模型的建立带来了极大的方便。

感谢师兄许国山、史鹏飞、王贞、赵俊贤、杨现东、马云、田俊、王锐、周慧蒙、谭晓晶，师姐王倩颖、李妍、邓利霞在课题方面给予的帮助，感谢吴勇、徐文田，他们或心胸豁达、或积极进取、或幽默风趣给我留下了深刻印象，他们将是我人生中最宝贵的人力资源财富！特别感谢张涛与我共同讨论研究电液伺服加载系统数值模型。

感谢我的父母，是他们的厚望以及鼓励和关心，使我走到了今天，祝他们身体健康！

感谢国家自然科学基金项目(90715036、50578047)和教育部新世纪优秀人才支持计划对本文研究工作给予的资助。

丁勇

2008 年 6 月于哈尔滨工业大学