

南京航空学院

硕士学位论文摘要汇编

(86级)



一九八九年十月

前 言

为了进行学术交流，并使所授学位的质量能得到同行的监督，现将我院 86 级已授予硕士学位研究生 166 人的学位论文摘要汇编成册，分送国务院学位委员会学科评议组的有关专家、各有关专业、学会、有关的高等学校和科研机构，请各位专家、同行评议，提出宝贵意见，帮助我们不断提高研究生的培养质量。

南京航空学院研究生部

一九八九年十二月

目 录

一、一般力学

贴片云纹干涉法测量位移与振动技术的研究	刘小廷(1)
子系统牛顿—欧拉递推法及程序	陈忠贵(3)
多刚体系统动力学的递推算法与计算机数值仿真	陈建平(5)
非线性结构振动的有限元方法及子结构模态综合法	潘兴志(8)

二、实验力学

用电阻应变片研究金属材料的滑移现象	王时越(10)
光纤组合探头性能的研究	刘向东(12)
单模光纤传感器	顾月清(14)
飞机有机玻璃舱盖内裂纹的检测方法	李晓辉(16)
疲劳寿命片的力学性能测试	胡明敏(18)
散斑 CCD 精密检测系统	朱红卫(22)

三、固体力学

磁吸振系统的设计与理论实验研究	荣见华(24)
无人机平尾动力模型的优化研究	余 岭(29)
桩基质量动测法的研究及其测试系统的开发	肖 俏(31)
粘弹性结构有限元分析和动态修改	喻慧华(34)
复合材料层板多孔连接中的一些问题	许希武(36)
复合材料脱层层板屈曲及脱层的扩展	邹振民(39)
复合材料叠层结构开口应力分析方法的研究	马庆丽(43)
复合材料层合结构非线性稳定性分析	穆 滨(45)
复合材料层合板自由边界效应的研究	胡志强(47)
复合材料层合板热应力分析	舒小平(50)
表面裂纹平板的胶粘贴补研究	陈 晓(53)
圆柱体表面横向裂纹的断裂力学研究	佟 刚(56)

三、空气动力学

解非线性可压位流方程的边界元法	戴忠涛(59)
-----------------------	---------

用有限体积法计算机翼的超音速绕流	孟颖琪(62)
无限后掠翼湍流附面层的分离流动计算	张宗斌(64)
机身散射与机身附面层折射对桨扇噪声的影响	黄文剑(66)
用场元法计算机翼非定常态的气动载荷	刘如铭(68)
翼梢小翼最佳弯度面的气动设计	冀河军(69)
平板紊流附面层摩阻减阻测量技术	王志丹(70)
微机实时控制技术在机翼颤振主动抑制低速风洞实验中的应用	毛 靖(72)
湍流度和噪声对转捩位置影响的实验研究	阎兆武(73)
亚临界大迎角翼—身组合体气动特性计算	赵微伟(75)
管道中旋流场的初步研究	徐少东(76)

五、飞行力学

用 OCM 分析纵向飞行品质	宋作芳(78)
纵向驾驶员诱发振荡理论分析	张洛宏(80)
飞机空间机动稳定性研究	丁纪平(82)

六、飞机设计

考虑操纵系统动态特性对直升机的飞行品质分析	王华明(84)
直升机叶尖研究	张明华(86)
直升机动力建模—旋翼试验台动力稳定性分析	李中延(88)
直升机动力入流	罗时稀(91)
F-19 隐身飞机隐身特性研究	李光跃(94)
复合材料湿热效应研究及结构优化设计	沈民生(96)
计算机辅助结构优化设计	张 沛(99)

七、人机环境控制

飞机空调系统冷风道多喷咀引射器性能研究	殷再琨(101)
飞机空调系统的优化设计和非设计工况性能计算	冯夕强(103)
板肋式紧凑换热器在航空蒸发循环制冷系统中的应用研究	龙 杰(105)

八、航空发动机

总压畸变流场变唇口模拟技术	毛 建(107)
二维钝体高超音速绕流研究	杨 标(109)
离心通风机在设计与非设计状态下的性能分析与计算	程卫国(111)
燃机排气装置的设计与试验研究	林 军(113)

多转子—支承系统的动力优化设计	罗贵火(115)
航空发动机数学模型参数的计算机闭环辨识	杨知平(118)
微机化仪表软件的计算机辅助设计系统	华志巍(124)
发动机模型参考自适应控制仿真研究	蔡青春(126)
串列叶栅边界层的试验研究	周鸿典(132)
带旋矩形喷流混合特性的试验研究	郑二宝(134)
Runge—Kutta 时间推进法在二维、无粘叶栅流场中的应用	张国清(136)
二元流场强激波与附面层相互作用控制研究	李峰斌(138)
高性能炮兵计算机指挥仪研究	沈晓春(140)
复杂载荷作用下壳体构件低循环疲劳寿命研究	杨雯雯(142)
最小二乘法在线辨识、在自整定 PID 控制中的应用	郭虹(144)

九、工程热物理

抑制发动机热排气红外辐射的实验研究	林建龙(148)
用蒸汽直接加热冷液的换热器的研究	曾元芳(150)
应用激光全息术研究喷嘴的雾化机理及雾化特性	周旭东(155)

十、飞行器导航控制系统

捷联航姿系统	刘新文(157)
C 语言在数字飞行控制系统中的应用研究	高莉新(159)
变结构系统理论及其在飞控系统中的应用	郑穗江(161)
常见低空风的数学模型及其对超低空飞行干扰的研究	黄仲文(163)
碳势及渗碳过程中的计算机控制	朱勇(165)
飞行器的鲁棒控制与智能控制	胡中汉(167)
一种新的机器人控制方案——结合自适应的非线性反馈控制方案	郑平(169)
动态用户 GPS 导航系统算法研究	何秀凤(171)
一种新的极点配置自校正控制器及其 8031 单片机实现	邹驰(173)
飞行器的鲁棒与容错控制	程炯(175)
飞行器变结构系统的研究	何亚群(177)
飞行器鲁棒控制系统的研究	王松花(179)
颜色测量系统	李斌(181)

十一、航空电气工程

永磁无刷直流发电机线路的研究	赵宇(183)
无刷直流方波电机调速系统的最佳参数匹配	薛晓明(185)
应用双环控制技术的开关型直流变换器的研究	陈道炼(187)

交流固态功率控制器的研制	谢筱华(189)
用于计算机辅助分析的晶闸管电路模型	欧阳长莲(191)
功率斩波电路的通用程序设计	蒋根华(193)
高精度快响应开关 DC/DC 变换器的研制	周洁敏(195)
开关磁阻调速电动机系统的研究	陈四清(197)
混合式步进电机三维静磁场有限元计算	王克勤(199)
模型参考解耦系统的优化设计	陈加清(201)
远场涡流效应三维数值分析的研究	林鹤云(203)

十二、飞行器仪表及测试

人体染色体数字图象处理及识别	陈德来(205)
全自动火灾报警系统设计	孙本玮(207)
叶片振动试验自动控制仪	杨小玫(209)
外冷式高温光纤压力传感器	华训银(212)
开关磁阻调速电机的单片机控制	孙千雨(214)
动态智能压力传感器	张洪亮(216)

十三、通信与电子系统

用高速数字信号微处理器实现多堆栈算法的卷积码译码器	林 伟(218)
切片的彩色三维重建	刘建松(220)
一种新的多面体投影线图的匹配方法	李丰林(223)
PN 序列快速同步捕获的仿真研究	聂景楠(225)
阻抗加载在电大尺寸金属体上的应用	邬纪召(227)
VHDLs——一种支持通用硬件描述语言的模拟器	孙景明(229)
遥测数据高速实时图形显示器	雷仲魁(231)
一种基于 PC 机的混合级逻辑模拟系统	汪健甄(233)
运算放大器电路系统的综合及计算机分析	周小江(235)
翼身融合过渡雷达散射特性研究	章传芳(237)
运动物体雷达成象的研究	林幼权(239)
冲激雷达目标识别中的信号处理	顾永红(241)
多脉冲激励 LPC 语言合成的硬件实现	郭 敏(243)
以 LPC 参数为基础连呼数字识别之研究	叶 明(245)
综合语音 / 数据扩频码分多址协议的研究	张 明(247)
RSA 公开密钥保密系统实现研究	卢建川(249)
广义相干处理距离——多普勒成像研究	丁 玮(251)
用数字信号处理器实现 MSK 调制器和解调器	诸昭华(253)
锁相环式快速跳频频率合成器的实现	陈晓华(255)

十四、机械制造

缓磨烧伤及其在线预报技术	徐西鹏(258)
切屑控制和切削用量优化的研究	徐九华(260)
刀具磨损破损在线监测系统的研制	沈小明(262)
磁性流体研磨的实验研究	张佳庆(265)
HP1000A700Micr027 计算机的开发与应用	郭彩芬(267)
电火花成型加工防电弧自调整控制系统研究	刘石安(269)
激光辐照改善 30CrMnSiNi2A 疲劳性能影响的研究	金杨福(271)
主从式多微机数字控制系统	章丽厚(273)
一类二维半铣削零件 CAD / CAM 一体化系统的研制与实际应用	习长青(275)
计算机辅助工艺过程设计专家系统	王 波(277)
柔性制造系统多微机网络模拟仿真系统	陈富林(279)
多关节工业机器人臂杆平衡方法研究	李思聪(281)
一种识别二维机械零件的机器人视觉系统	张乐益(284)
微型计算机动画显示初探	吴为民(286)
交互式实体造型系统的探讨	佟常飞(288)
快走丝线切割机床精化问题研究	刘志东(290)
快速走丝电火花线切割机床多次切割工艺研究	郭钟宁(291)
电火花线切割表面抛光工艺试验研究	杨建明(292)

十五、机械学

挠性气体动压径向轴承的理论分析	戚晨波(294)
航空锥齿轮计算机辅助设计系统	周庆敏(296)
钛合金 TC11 与耐热合金 GX8 的微动损伤及其摩擦系数试验研究	李映平(298)
高周、低周及高低周复合载荷作用下微动损伤的试验研究	王春明(300)
高速大功率叠层膜片挠性联轴器的设计准则研究	申屠留芬(302)
常闭式摩擦离合器非稳定过程的动力学研究	翟锁金(304)

十六、航空宇航制造工程

计算机辅助框架设计——柱绘图设计子系统	郑书平(306)
交互式计算机辅助设计 / 绘图系统	陈文亮(308)
交互式曲面造型系统 BSURF-G1	周来水(311)
三坐标测量机测量软件及准确度的研究	杨 明(313)
Ti-6Al-4V 扩散连接研究	黄卫东(316)
Ti-6Al-4V 板料超塑性性能研究	章伟承(318)

十七、航空宇航系统工程及管理工程

南京毛麻纺织企业集团管理决策模型	姜 鸣(319)
冲压件分类编码、成组 CAD 和 CAPP 系统的研制	沈 辉(321)
成都飞机公司产品机加零件分类编码系统研制	程 惟(326)
工业研究开发单位改革深化程度的评价	杨燕平(329)
冲压机械安全人机工程的应用研究	宋光平(332)
求解多目标规划的交互式两阶段法	包志虎(334)

十八、计算机应用

TMR-BITE 十六位单片机容错系统 SCFT	吉根林(337)
局部计算机网络与中大型机的互连及其实现研究	易宏元(338)
智能高分辨率彩色图形系统研究	伍先林(340)
OSI 会话层的研究、设计及实现	缪金保(342)
第四代语言 NH4GL 的视图与安全机构	温明华(344)
加权自适应模式识别系统	徐 涛(346)
实时图象多处理机分析系统	陈克亚(348)
JL-I 英汉机器翻译系统的设计与实现	陈震杰(350)
医学专家系统开发工具	赵逢余(352)
实用计算机语音线性预测合成器的研究	顾伟宁(354)

十九、计算数学

极点配置问题	李金良(359)
关于状态反馈极点配置问题的算法	葛晓军(362)
双三次样条曲面的求交与曲面的消隐	倪仕升(365)
无穷区间上函数的指数逼近与 Laplace 变换的数值反演	戴 煜(367)
双曲型守恒律高精度差分格式的研究	赵 宁(370)

贴片云纹干涉法测量位移与振动技术的研究

学科、专业： 一般力学
研究生姓名： 刘小廷
指导教师： 苏英坚

入学时间： 1986 年 9 月
答辩时间： 1989 年 3 月
授予学位： 硕士

一、引言

作为一种高灵敏度大量程的技术，由 Post 等提出的双光束云纹干涉法可实时地获得面内位移场。但是这种方法实光栅复制技术复杂，光路调整难使其不易推广。天津大学研究成功的贴片云纹干涉法克服了以上缺点，它具有方法简单，精度高，量程大等优点，目前在面内位移及应变场测量方面得到应用。本文工作进一步扩大了贴片云纹干涉法的应用范围，提出了用贴片云纹干涉法测量离面位移及振动，为光测位移与振动提供了一条新途径。

二、贴片云纹干涉法测量离面位移

首先用付立叶光学推导面内位移定量公式，设两准直光波矢量间夹角 2α ，相对于试件对称入射，试件加载前后两次曝光的总强度为

$$I = 4R_0^2 + 4R_0^2 \cos \alpha(x, y) \cos^2[\delta(x, y)/2] - 2R_0^2 \sin \alpha(x, y) \sin \delta(x, y) \quad (1)$$

其中 $\alpha(x, y)$ 为两光束初始位相差， $\delta(x, y)$ 为位相变化之差。由 (1) 式知当 $\delta(x, y) = 2m\pi$ 时出现亮条纹。又知 $\delta(x, y)$ 与位移 u 有如下关系

$$\delta(x, y) = 4\pi u(x, y) \sin \alpha / \lambda = 2\pi f_x u(x, y)$$

所以

$$u(x, y) = m / f_x = m p_x \quad (2)$$

与用普通云纹法解释一致。

若双光束非对称入射。设其入射角为 α_1, α_2 ，则 $\delta(x, y)$ 可写成

$$\delta(x, y) = 2\pi[u(x, y)(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) - w(x, y)(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)] / \lambda$$

对于纯弯曲变形可认为 $u \approx 0$ ，根据上面推导有

$$w(x, y) = m\lambda / (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = mp$$

经对悬臂梁挠度测量结果表明以上推导是正确的，相对误差小于 5%。

三、贴片云纹干涉法测量振动

这是本文核心内容。作者提出用时间平均贴片云纹干涉法测振动，首先从理论上推导

了一维横向振动的计算公式, 指出物体振动时间平均曝光结果是对静止时物表面原栅线高频变化部分被零阶贝塞尔函数调制, 具体形式为

$$E = 2R_0^2 \{1 + \cos[kx(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)] \cdot J_0[kA(x, y)(\cos\gamma_1 - \cos\gamma_2)]\} \quad (3)$$

其中 α 、 γ 为准直光波矢量与 X、Z 轴正向间小于 180 度夹角, 设云纹图上某点对应的贝塞尔函数的宗量为 Z_1 , 由此可算得

$$A(x, y) = Z_1 / [k(\cos\gamma_1 - \cos\gamma_2)] = Z_1 / (2\pi f_z) \quad (4)$$

作者进一步利用全息记录介质的多重记录特性, 提出了用三光束测量三维振动的理论。设三束光具有等强度, 它们相互干涉形成三组空间虚栅, 当对振动物体进行时间平均曝光时, 经显、定影处理后的胶片就可以在不同的方向上观察到三组云纹。由这三组云纹可求解三维振幅场。设静止时三束准直光的复振幅分别为

$$R_j = R_0 \exp\{ik(x\cos\alpha_j + y\cos\beta_j + z\cos\gamma_j)\} \quad j = 1, 2, 3$$

则对振动物体时间平均曝光结果为

$$\begin{aligned} E = & 3R_0^2 + 2R_0^2 \cos 2\pi[f_{x12}x + f_{y12}y + f_{z12}z] \cdot J_0\{2\pi[f_{x12}A_x + f_{y12}A_y + f_{z12}A_z]\} + \\ & + 2R_0^2 \cos 2\pi[f_{x13}x + f_{y13}y + f_{z13}z] \cdot J_0\{2\pi[f_{x13}A_x + f_{y13}A_y + f_{z13}A_z]\} + \\ & + 2R_0^2 \cos 2\pi[f_{x23}x + f_{y23}y + f_{z23}z] \cdot J_0\{2\pi[f_{x23}A_x + f_{y23}A_y + f_{z23}A_z]\} \end{aligned} \quad (5)$$

可见其结果是对静止时原三组条纹的高频变化部分分别被零阶贝塞尔函数所调制, 设物面同一点处三组条纹对应的贝塞尔函数宗量为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 , 则可求得

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{bmatrix} f_{x12} & f_{y12} & f_{z12} \\ f_{x13} & f_{y13} & f_{z13} \\ f_{x23} & f_{y23} & f_{z23} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

本文测量了悬臂板和机翼板的一维及三维模态, 结果表明与理论分析吻合得很好, 可见用云纹干涉法测板的振动是合适的。作者设计了一套能方便用于位移及振动模态分析的光路系统。理论与实践结果表明本方法的测量精度和灵敏度与全息法相当, 但可测范围大, 防震要求低, 且灵敏度随意可调。但对曲面物体的测量还有一些实验技术有待进一步研究。

本文是在导师苏英坚付教授的指导下进行的, 伊宁卡老师也给了很多帮助。在此表示感谢。

子系统牛顿—欧拉递推法及程序

学科、专业：一般力学

入学时间：1986年9月

研究生姓名：陈忠贵

答辩时间：1989年3月

指导教师：朱明、苏乙波

授予学位：硕士

本文应用子系统牛顿—欧拉递推法，对多刚体系统进行了进一步的推导，并应用此方法推导了多刚体系统的碰撞动力学方程，含有弹性体的多体系统动力学方程，以及应用奇异值分解求伪逆，通过对铰冲量的优化来求解冗余自由度机构及机器人等的运动学反问题，并编制了处理多刚体系统运动学及动力学问题的通用程序 SNERM(Sub-system Newton-Euler Recursive Method)，本文共分六章。

第一章为引言部分，在引言中，主要对近期国内外多体理论的发展和它的应用，进行了简要综述。

第二章为应用子系统牛顿—欧拉方法推导多刚体系统动力学方程，对子系统牛顿—欧拉方法的基本思想及其基本推导方法进行了较为详细的阐述，并得到了树结构系统动力学方程：

$$A\dot{g} = B$$

式中 $A = \Phi^T J J^T \Phi$ 为广义惯量阵

$$B = M^s - \Phi^T \hat{T} (\hat{W} J J^T \Phi + J J^T \Phi) g + \Phi^T \hat{T} \hat{M} g - \Phi^T \hat{T} [\hat{f}(\hat{G}_0, \hat{G}_0) + F(g^{*k}, \dot{g}^{*k})] - f^i(\dot{\Phi})$$

B 由外力和广义惯性力组成。

得到非树结构多体系统动力学方程如下：

$$\begin{cases} A\dot{g}_A = F(p_A, g_A, t) + H^T M_c^c \\ H g_A^c = C' \end{cases}$$

对非树结构系统动力学方程的求解采用了增广法和奇异值分解的方法。

第三章为应用子系统牛顿—欧拉方法的基本公式及 SVD 求伪逆的理论和算法，解决运动学的正反问题，特别是冗余自由度机构及机器人的反问题。其方法为：

$$\Delta P_A^1 = G^+ \Delta Z$$

在已知 P_A 的初始参数后，应用 Newton—Raphson 迭代法

$$P_A^{K+1} = P_A^K + \Delta P_A^1$$

第四章为处理多刚体系统碰撞动力学部分，以子系统牛顿—欧拉递推法为基础，引入碰撞关联矩阵，建立起了多刚体系统碰撞的动力学方程。

当系统受到外冲力作用，其动力学方程为：

$$A \Delta g = \Phi^T \hat{T} M^I$$

式中 $A = \phi^T \hat{T} \hat{J} \hat{T}^T \phi$, 同前, 为广义惯量阵。

$\hat{M}^I$ 为冲力向铰点简化所得的冲力及冲力矩组成的矩阵

当系统内部或系统与系统之间发生碰撞, 其动力学方程为:

$$\delta g = A^{-1} \phi^T \hat{T} \hat{G}_n F^*$$

$$A^* F^* = B^*$$

式中 F^* 为碰撞点处的碰撞力组成的矩阵。

第五章处理了弹性多体系统的动力学方程, 本章对子系统牛顿—欧拉法作了进一步的扩充, 对弹性体的变形, 用振动模态及模态坐标来表达:

$$u(t) = \psi(q(t))$$

对铰点连接模态矩阵进行了进一步的修正, 使其适合于弹性多体系统动力学方程的推导, 因此建立起了弹性多体系统动力学的方程, 包括树结构及非树结构系统, 其形式同刚体部分所得方程一样, 都为:

树结构系统: $A \dot{g} = B$

非树结构系统:

$$\begin{cases} A g_A = F(P_A, g_A, t) + H^T M_c^c \\ H g_A = C' \end{cases}$$

但其中各项的内容都由新的变量组成。

第六章简述了应用子系统牛顿—欧拉法所编写的程序 SNERM 的数值求解方法, 程序的功能以及举出了四个算例。

多刚体系统动力学的递推 算法与计算机数值仿真

学科、专业： 一般力学

入学时间： 1986 年 9 月

研究生姓名： 陈建平

答辩时间： 1989 年 3 月

指导教师： 苏乙波、朱 明

授予学位： 硕士

本文在国内外有关学者研究成果的基础上，以牛顿—欧拉法为出发点，采用一种较为新颖的建模思想，导出了建立开环系统运动学、动力学方程的预处理公式与递推公式，成功地解决了开环系统的运动学正问题，动力学逆问题和动力学正问题。文中所述方法使得多刚体系统动力学的建模进一步程式化、简单化，仿真时间进一步缩短，而且较好地处理了转动铰和移动铰同时出现的混合系统。对于受约束系统，建立了相应开环系统的动力学方程和受约束系统的约束方程。约束方程的建立，不仅方法新颖、简单、规范，而且对本文中所论及的受约束系统，无论形式如何，均无需人的干预，因而通用性较强，并采用奇异值分解(SVD)方法很好地处理了微分—代数混合方程的求解问题，使得积分方程的数目最少（对于闭环系统为 $2m$ 个一阶微分方程， m 为闭环系统的自由度），成功地解决了受约束系统的动力学正问题，最后利用作者所编制的 FORTRAN 通用程序对两个算例进行了计算机数值仿真，结果令人满意。

文章共分五个部分：

一、系统描述与运动学

这部分以具有单链、开环、单自由度铰（包括转动铰和移动铰）结构的多刚体系统为研究对象，系统的描述采用一种新的坐标系，它类似于 Denavit—Hartenberg 坐标系，但传统的 Denavit—Hartenberg 坐标系不尽相同，文中导出了一系列的（角）速度和（角）加速度递推公式。

二、开环系统动力学

包括动力学逆问题和动力学正问题，对于动力学逆问题，将牛顿—欧拉方程与第一部分导出的递推公式相结合，从而得出了动力学逆问题的递推公式。此外，还讨论了多刚体系统中任一刚体内部受力情况的计算，即刚体某一截面上沿某一方向的内力或绕某一轴的内力矩的计算。

对于动力学正问题的计算机建模与数值仿真，所要求获得的并不是其动力学方程中每

一项的具体表达式，而只是下面这一方程的一般形式：

$$\underline{H}(\underline{q})\underline{\ddot{q}} = \underline{\tau} - \underline{b} \quad (1)$$

其中 $\underline{H}(\underline{q})$ $n \times n$ 对称，非奇的惯性矩阵

$\underline{\tau}$ $n \times 1$ 的驱动力(矩)列阵

$\underline{b}$ $n \times 1$ 的重力，离心惯性力、科氏惯性力以及其它外力（如机器人的工作载荷）等的影响列阵

显然， $\underline{b}$ 的计算是很容易的，若令系统处于下述状态： $\underline{q}$ 、 $\underline{\dot{q}}$ = 当前值、 $\underline{\ddot{q}} = 0$ ，0 刚体按已知规律运动且增加一铅垂向上的加速度 $g = 9.80621 \text{ m/s}^2$ ，并使工作载荷等其它外力保持为当前值，在此状态下求解动力学逆问题计算系统各铰上的驱动力（矩），即为 $\underline{b}$ 的相应元素。

对于惯性矩阵 $\underline{H}(\underline{q})$ ，文中表明，若令系统处于下述状态： $\underline{q}$ = 当前值， $\underline{\dot{q}} = 0$ ， $\underline{\ddot{q}}$ 除 $\ddot{q}_i = 1$ 外其余均等于 0，0 刚体静止且不计重力，阻尼力，弹簧力以及工作载荷等外力，在此状态下求解动力学逆问题，计算系统各铰上的驱动力（矩），即为惯性矩阵 $\underline{H}(\underline{q})$ 的第 i 列，当然，在此基础上，文中还导出了一系列的递推公式并对系统的惯性参数进行了重新组合与取舍，再利用了惯性矩阵 $\underline{H}(\underline{q})$ 的对称性，使得其计算大为简化，计算效率大大提高。

三、闭环系统动力学

闭环系统的运动方程可描述如下：

$$\underline{H}(\underline{q})\underline{\ddot{q}} = \underline{\tau} - \underline{b} \quad (2)$$

$$\underline{A}\underline{\dot{q}} = 0 \quad (3)$$

式(3)对时间求导得

$$\underline{A}\underline{\ddot{q}} = -\underline{\dot{A}}\underline{\dot{q}} \quad (4)$$

其中 $\underline{A}$ 为 $6 \times n$ 的雅可比矩阵。

对于闭环系统，我们采用切割刚体的方法，于是方程（2）就是切割后相应开环系统的动力学方程，方程(3)就是速度水平的约束方程，方程（4）就是加速度水平的约束方程。

显然，借助于第二部分讨论的方法，方程（2）是很容易获得的，注意在方程（2）中，约束反力（矩）没有计入，这是因为在简化和求解方程（2）与（4）时，我们将用奇异值分解（SVD）将其消除，故这里无需计入。

对于方程（3）和（4）的建立，目前这方面的讨论很少，根据文中所述的方法，方程（3）和（4）极易获得且无需求导（对于复杂系统来说，求导是很困难的），注意方程（3）和（4）的物理意义， $\underline{A}$ 的第 i 列可以通过令系统处于下述状态沿闭环求被切开刚体两部分之间的相对（角）速度而得到： $\underline{q}$ = 当前值， $\underline{\dot{q}}$ 除 $\dot{q}_i = 1$ 外其余均等于 0。类似地， $\underline{A}\underline{\ddot{q}}$ 也可以通过令系统处于下述状态沿闭环求被切开刚体两部分之间的相对（角）加速度而得到： $\underline{q}$ 、 $\underline{\dot{q}}$ = 当前值， $\underline{\ddot{q}} = 0$ 。需要指出的是，实际上，根据本文所述的方法，在构造方程（2）时 $\underline{A}$ 和 $\underline{A}\underline{\ddot{q}}$ 就已经计算过了，因此其结果可以直接利用，这就大大简化了运算。另外，文中还详细讨论了开环系统在给定约束下的动力学正问题*（如机器人在给定手端运动规律的情况下的动力学正问题）。由文中可见，应用奇异值分解简化和求解方程

(2) 和 (4) 是非常令人满意的。

四、算法与程序说明

文中就 Runge-Kutta 和 ADAMS 预估—校正两种积分方法进行了比较, 作者认为, ADAMS 预估—校正法更适宜于多刚体系统动力学的数值积分, 最后作者用 FORTRAN 语言编制了多刚体系统动力学的计算机数值仿真程序并给出了程序框图。

五、算例仿真与结果分析

这部分以 Stanford 机械手和端部运动已知的五杆链索为例进行了动力学逆问题和动力学正问题的数值仿真, 并对结果作了详细分析, 绘出了相应的曲线。

从算例的仿真结果来看, 文中所述的方法是成功的, 有效的, 简单的。

非线性结构振动的有限元 方法及子结构模态综合法

学科、专业： 一般力学
研究生姓名： 潘兴志
指导教师： 朱世晋

入学时间： 1986 年 9 月
答辩时间： 1989 年 3 月
授予学位： 硕士

近几十年来，结构的塑性动力响应的研究愈来愈受到人们的重视，汽车，火车，飞机，轮船等高速行驶的运输工具在撞击中的破坏问题，在地震波及冲击波作用下的各种结构的强度设计，金属的爆炸成形工艺，化学反应，核反应堆的高压容器的安全性设计等等，都与这类弹—塑性非线性动力响应的研究有关。随着工业技术的发展，更加速了这类非线性动力响应问题的深入研究。与此同时，关于弹—塑性动力响应问题中的一般理论也相应有很大的发展，这些理论为寻求问题的精确解和近似解提供了依据。

对于材料的塑性变形动力响应的研究，最初假设为理想的刚—塑性材料的动力响应问题，把材料的塑性变形看成是一个塑性铰链，而其它部分则可假设为刚体，这在塑性问题的研究史上是一个较大的突破，这种假设模型的精度有限，有时难以满足工程需要，特别是在动力响应问题上，如果输入给结构的初始动能与可能储存于结构中的最大弹性应变能相比不是很大，或者输入结构的脉冲载荷的时间较长，这时一般就要计入弹性应变能的响应。李华仪等在“A minimum principle in dynamics of elasticplastic continua at finite deformations”中，假设总应变可分解为弹性应变和塑性应变两部分之和，并在此前提下给出了在有限变形情况下的极值原理，本论文亦是基于应变增量的总量 $d\varepsilon$ 由弹性应变增量 $d\varepsilon^e$ 和塑性应变增量 $d\varepsilon^p$ 两部分组成这一假设：

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p$$

并利用塑性流动理论及塑性加—卸载准则，推出了此时的弹—塑性本构关系矩阵：

$$[D_{ep}] = [D] - [D_p]$$

其中：[D]——弹性矩阵

[D_p]——进入塑性状态时的塑性矩阵

$$[D_p] = \frac{[D] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{-A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}}$$

[D_p]是以微分的形式给出的量，它是位移的函数，是非线性项。一般情况下，要计算一个弹—塑性材料的动力响应是很复杂的，且计算量十分庞大，在电子计算机出现之前，对于这一类型的非线性动力响应问题，在实际计算中一般只能采用简单粗糙的近似方法来获

得其数字解，最简单的解法就是把结构的动力响应问题简化为“一个自由度”系统的问题，即在整个响应过程中速度的分布形式不变，这时所求的仅是积分意义下的满足运动方程的解。由此可能带来很大的误差，在很多情况下是不能满足工程要求的，随着电子计算机和有限元理论的迅速发展，给实际结构的这类非线性分析添加了巨大的生命力，非线性研究工作取得巨大的进展，对复杂结构建立更符合实际情况的非线性模型，然后利用非线性有限元方法得到相应的非线性运动方程，再利用各种直接积分的方法求解它们的运动方程。一般的有限元方法在求解非线性结构的动力响应问题具有较大的误差，在这里利用等参数单元进行计算。在有限元计算中，要对由微分形式给出的弹——塑性本构关系矩阵进行改造，使弹——塑性本构关系矩阵以应力有限大小的形式和应变有限大小的形式给出，即获得：

$$[D_{\sigma, \epsilon}]_{\text{有限元}} = [D] + [D_p]_{\text{有限元}}$$

从而形成弹——塑性状态下的运动方程

$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + ([K^L] + [K^N])\{\delta\} = \{R\}$$

其中：[K^N]为非线性项。

为了利用线性有限元运动方程的某些结论，将[K^N]{δ}移到方程的右边，使之成为一非线性力，简化求解的计算量，利用 Wilson-θ 法进行求解计算，并在每一 Wilson-θ 的求解时间步内进行 Newton-Raphson 迭代，以获得更准确的近似解。即使对此非线性有限元运动方程采取各种不同的数字解法，随着工程结构的越来越复杂，其有限元的自由度数也越来越大，这样，大型的矩阵运算在所难免，而与大规模的矩阵处理相关联的矩阵舍入误差，冗长的算时，巨大的存储量，都给这样的运算带来很大的困难。同时工业技术的不断前进，经常要求准确而迅速地分析整体结构的动态性能。这样就使得模态综合技术发展起来，它既能大大地缩减系统的计算规模，又能保持完整结构的主要动态特性，从而大大地加速了复杂结构的动态分析。本论文在[20][21][32]的基础上，将模态综合技术进一步推广到一般非线性系统中去，以弹——塑性材料结构为主要算例，将推导的方法应用到自由——自由梁受冲击载荷作用下的动响应问题，以及简支梁受简谐激振力作用下的弹——塑性动力响应计算中，从得到的结果来看，此方法在计算机时上比直接求解方法减少很多，且有很高的精度，在工程应用中有很高的应用价值。