

齿轮系统

动态设计

王庆 著

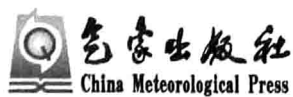


气象出版社

China Meteorological Press

齿轮系统动态设计

王 庆 著



内容提要

目前,国内外众多学者在齿轮传动系统动力学特性分析及结构动力修改等齿轮系统动态设计相关领域作了大量研究,但还缺乏一套适用于工程应用的较完整的齿轮系统动态设计理论与方法。本书基于机械系统动力学理论、模态及动力响应有限元分析方法以及实验模态测试技术,对齿轮系统的动态设计方法进行了研究,提出了一套在设计阶段对齿轮系统进行结构动力学建模,对其进行动态特性、响应分析以及结构动力修改的具有实用价值的方法。本书可供齿轮系统的设计、研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮系统动态设计/王庆著. —北京:气象出版社,
2014.5

ISBN 978-7-5029-5928-9

I. ①齿… II. ①王… III. ①齿轮传动-动态设计
IV. ①TH132.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第081288号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:彭淑凡 杨柳妮

封面设计:燕 彤

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:850mm×1168mm 1/32

字 数:110千字

版 次:2014年5月第1版

定 价:15.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68407948 68406961

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:汪勤模

责任技编:吴庭芳

印 张:4.25

印 次:2014年5月第1次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究目的与意义	(1)
1.2 研究动态	(2)
1.3 本书研究内容	(9)
1.4 本书章节安排	(10)
第 2 章 齿轮系统结合部动力学参数识别	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 齿轮系统轴承支承结合部动力学参数识别方法 ...	(14)
2.3 齿轮轴实验模态参数识别	(24)
2.4 轴承支承结合部动力学参数识别结果	(34)
2.5 本章小结	(36)
第 3 章 齿轮系统动力学建模及耦合非线性动力分析	(37)
3.1 引言	(37)
3.2 齿轮系统动态激励的类型及产生机理	(38)
3.3 斜齿轮传动系统耦合非线性动力学模型	(42)
3.4 斜齿轮传动系统耦合非线性动力学模型仿真分析 ...	(51)
3.5 齿轮系统箱体动力学仿真分析	(68)
3.6 齿轮箱箱体振动实验分析	(74)
3.7 本章小结	(83)

第 4 章 齿轮传动系统耦合动态特性分析	(84)
4.1 引言	(84)
4.2 动态特性的有限元计算方法	(85)
4.3 斜齿轮传动系统弯-扭-轴-摆耦合振动有限元建模	(94)
4.4 轮齿啮合刚度及支承刚度系统动态特性的影响 ...	(102)
4.5 本章小结	(105)
第 5 章 基于有限元的齿轮传动系统结构动力修改研究	(106)
5.1 引言	(106)
5.2 机械结构灵敏度分析技术	(107)
5.3 基于有限元的结构动力修改	(113)
5.4 基于有限元的动态特性灵敏度分析程序实现	(114)
5.5 基于有限元的齿轮传动系统结构动力修改讨论 ...	(116)
5.6 本章小结	(119)
结束语	(120)
主要参考文献	(125)

第1章 绪论

1.1 研究目的与意义

随着机械产品与设备日益向高速、精密、轻量化及自动化方向发展,产品结构日益趋于复杂,对其工作性能的要求也越来越高。为了使这些设备能安全可靠地工作,其结构必须具有良好的静、动态特性。要实现这些目标,必须对产品结构进行动态分析与动态设计,即在设计时要考虑在动态条件下产品结构振动等动力学特性。产品设计从类比、静态设计过渡到对产品进行动态分析与设计已成为机械结构设计的必然发展趋势。目前,国外在结构动态设计这一领域的研究十分活跃,美国及欧洲等一些工业发达国家都将动态设计列为结构设计领域的重点发展方向之一。我国在这一领域的研究还比较落后。为了提高我国机械产品的现代化设计水平,增强我国机械产品与设备在国际市场的竞争能力,必须重视对结构动态设计理论与方法的研究。

结构动态设计是一项正在发展中的新技术,其涉及动态分析方法、计算机技术、产品结构动力学理论、设计方法学等众多学科范围。机械结构动态设计的大体过程是对满足工作性能要求的初步设计图纸,或要进行改进的机械结构进行动力学建模,并作动态特性分析。根据其动态性能要求或预定的动态设计目标,进行结构修改预测、再设计和结构的重分析,直到满足结构动态性能的设计要求。

由于齿轮传动具有传动速度平稳、恒功率传动的优点,因此,它在国防、民用产品领域被大量采用。传统的齿轮传动系统设计方法中存在的主要问题是静态问题考虑多,动态性能分析不够,很少进行动态设计。而机器的振动和噪声大部分来源于齿轮传动工作时产生的振动,齿轮系统的动力学行为与工作性能对整部机器有重要影响^[1]。因此,近百年来齿轮系统动力学问题一直受到人们的广泛关注。随着齿轮传动的高负荷及高速化趋势的增强,齿轮传动系统的动态设计方法研究已成为一个重要的热点研究课题;研究建立系统在工作状态下的动力学分析模型,计算所设计齿轮系统在内、外激励下的动态响应,进而修改设计参数,改善其动态性能。经过不断地预测、评价和修改使齿轮系统动态性能满足设计要求,达到动态优化设计,有利于达到提高设计质量、缩短设计周期及保证设计可靠性的目的^[1]。

可见,动态设计是获得高质量、高性能齿轮传动系统的必然要求。齿轮系统动态设计内容主要包括三个方面:①建立系统的结构动力学模型;②系统的动态特性及响应分析;③系统结构动力修改。

1.2 研究动态

齿轮系统动力学特性研究是齿轮传动装置动态设计的重要一环。在实际工作状态下,齿轮传动会产生动载荷。为保证可靠的传动性能,必须较为准确地确定动载荷及其激励因素。同时,齿轮系统的振动水平直接关系到齿轮传动装置辐射出的噪声。为了设计高质量的齿轮传动装置或改进现有的设计,需要深入地研究和了解齿轮传动系统的动力学特性。

齿轮系统是由齿轮副、传动轴、支承轴承、箱体、原动机及负载等零部件组成的多弹性体连续系统。同时,齿轮传动系统是一个齿轮耦合的多轴轴承-转子系统,是轴承-转子系统动力学研究中最复杂的一类。由于齿轮副的存在,造成系统中各转子(传动轴)之间不

同运动的相互耦合,从而使得对齿轮传动系统的动力学分析不能仅从单根轴轴承-转子系统来考察,而必须以整个齿轮耦合的多轴轴承-转子系统为研究对象^[2]。

齿轮动力学是研究齿轮系统在传递运动和动力过程中动力学行为的一门科学。它以齿轮系统为对象,以齿轮副啮合过程的动力学特性为核心,以提高和改善齿轮系统的动力学行为为目的,在充分考虑系统各零部件动态特性的基础上,利用振动力学理论和方法,研究齿轮系统在传递动力和运动中振动、冲击、噪声的基本规律,为设计、制造低振动、低噪声、高可靠性、高传动性能的齿轮系统提供理论依据^[3,4]。

齿轮系统动力学的研究始于20世纪20年代至30年代早期,当时的研究主要通过分析和实验方法对齿轮高速运转时轮齿动载荷进行预估,其分析理论则主要以啮合冲击作为描述、解释齿轮动态激励与动态响应的基础,将齿轮传动系统简化为简单的单自由度系统,用冲击作用下的单自由度系统动态响应来表述齿轮系统的动力学特性。自20世纪70年代至今,人们逐步完善了齿轮系统动力学分析模型,从最初的动载荷系数模型到不考虑齿轮的横向位移的齿轮副扭转振动模型,进一步发展到考虑齿轮副、传动轴、支承轴承、原动机和负载的弯-扭-轴-摆等多自由度相互耦合的传动系统模型,最后发展为考虑传动系统和结构系统耦合作用的最复杂的完整齿轮系统模型。这种完整齿轮系统模型考虑了时变啮合刚度、系统中各组成元件的非线性、轮齿间摩擦力、阻尼以及激励效应。利用这种模型不仅可以全面了解系统中各零件的动态特性,而且还可以研究动态啮合力 and 啮合力由轮齿至箱体的动态传递过程以及箱体的振动特性和噪声辐射特性^[3-5]。随着有限元技术的发展,在齿轮动力学研究中,也出现了有限元模型,主要用来确定轮齿的变形、应力、刚度等。A. Kahraman 等对齿轮系统振动特性作了大量研究,分析了多对齿啮合的斜齿轮系和行星轮系的动力特性以及轴向振动对斜齿轮动力

特性的影响,还用动态试验方法分析了齿轮受迫响应特征和渐开线重合度及齿顶修缘对动态性能的影响^[6-8]。汤和对理想齿轮噪声与振动谱进行了计算机仿真分析^[9]。H. Vinayak 等用 Rayleigh-Ritz 法和有限元法计算了受刚性和弹性约束时的直齿轮系统自由和受迫振动特性,得出的系统模态参数与试验结果相吻合^[10]。J. S. Burdess 等用有限元法及试验方法对斜齿轮轴作了模态分析^[11]。Shaofeng Wang 等建立了三维斜齿轮副振动模型^[12],模型中考虑了齿轮的横向弯曲振动、扭转振动、轴向振动、扭摆振动的耦合作用,并采用试验模态方法识别出轴承刚度、阻尼及啮合齿对的刚度和阻尼,然后又用计算机对理论模型进行仿真计算,为预测齿轮系统的振动提供了理论依据。H. Houjoh 等对弹性轴上斜齿轮对的振动进行了分析,用 12 个自由度振动模型建立微分方程,用 Runge-Kutta-Gill 法求解,分析结果与试验吻合良好^[13]。P. Velez 和 C. Bard 等用数值方法和试验方法分析了圆柱齿轮基节误差及齿向误差对动态性能的影响^[14,15]。李润方、王建军等在国内首次对齿轮系统振动问题作较为系统、深入的研究^[3,16-25],建立了齿轮系统动力学的比较完整的理论体系,提出了较为完善的齿轮系统动态研究的理论和方法,围绕动态激励、模型类型、建模和求解方法以及齿轮系统的固有特性、动态响应和动力稳定性等方面研究了齿轮系统所涉及的基本问题,取得了较为深入的理论成果。余光伟用有限元方法对多平行轴齿轮-轴承-转子系统耦合振动进行了分析,研究了在不同支承条件下啮合刚度、转速等参数对系统动态性能的影响,得到了一些对齿轮系统动态设计具有参考价值的结论与数据^[26]。

随着人们对传动性能要求的不断提高,齿轮系统动力学越来越广泛地受到学术界与工程界的重视。从目前的文献资料来看,齿轮动力学研究的主要领域有:建立齿轮传动系统的动力学分析模型;传动系统的动态特性分析与动态响应计算;分析齿轮、传动轴、轴承、箱体的设计参数及结构对系统动态特性的影响等。目前齿轮系统动力

学问题的分析已经形成了一套基本理论体系,相关研究成果为齿轮动载系数计算、振动噪声预估与防治、状态检测与故障诊断、载荷识别与动态设计等方面的工程应用提供了重要的理论基础。

齿轮系统中包含了许多非线性因素,例如时变啮合刚度、传动误差、齿侧间隙和齿轮传动中的其他传动间隙(如离合器齿槽侧隙、滚动轴承、滑动轴承的间隙)等。在振动理论框架内,齿轮系统动力学经历了由线性振动理论向非线性振动理论的发展。在线性振动理论的范畴内,人们以平均啮合刚度替代时变的啮合刚度,并由此计算齿轮副的固有频率和振型及系统的动态响应。这一过程不考虑由时变啮合刚度引起的动力稳定问题,且避开了齿侧间隙引起的非线性,忽略多对齿轮副、齿轮副与支承轴承、支承间隙等时变刚度间的相互关系和相互作用对系统动态特性的影响。而齿轮传动系统非线性动力学理论则考虑了啮合刚度的时变性以及齿侧间隙、齿轮啮合误差等非线性因素,把齿轮传动系统作为一种非线性的参数振动系统来研究其基本理论、方法和性质。从本质上说,工程中所有的问题都是非线性的,有许多工程问题只有应用非线性理论进行分析才能得到符合实际情况的结果。要准确深入地了解机械设备的真实运动及动力学规律,应该对机械设备作非线性理论分析。基于以上原因,齿轮非线性动力学问题已成为现代齿轮动力学研究的热点。

对齿轮系统非线性的研究较早的有 R. C. Azar 等利用数值仿真法研究了直齿轮系统间隙非线性问题,并考虑了齿轮惯性、时变刚度、齿面摩擦等的影响^[27]。Iida 等研究了时变刚度、齿侧间隙对齿轮传动系统动态响应的影响^[28]。A. Kahraman 等同时考虑间隙非线性和啮合刚度时变性,用有限元法分析了齿轮-传动轴-支承系统的振动特性,探讨了直齿轮的非线性动力学行为,对直齿啮合中的间隙非线性动态特性及由传递误差引起的内部激励的影响进行了研究,比较了内部激励和外部激励的差别^[29]。王玉新等用多尺度法研究考虑轮齿时变刚度和静态传递误差激励的齿轮系统的动态特性,

给出了系统在不同激励频率下系统稳态响应的求解方法,以及系统稳态解的解析表达式,用数值方法对解析法分析的结果进行了验证^[30]。李素有等建立了斜齿轮副的间隙型非线性扭振模型^[31],其中考虑了斜齿轮副的啮合综合误差、齿侧间隙和时变啮合刚度,用数值积分方法对系统的非线性动力学微分方程进行了求解,获得了斜齿轮副在外转矩作用下受静态传动误差激励的非线性稳态强迫响应,并对系统的动态响应进行了测试。沈允文、孙涛等用谐波平衡法研究了时变啮合刚度、误差和齿侧间隙对系统非线性动力学行为的影响^[32,33]。张锁怀等在考虑齿轮时变啮合刚度、齿侧间隙、脱齿、挤齿及齿背接触等因素的情况下,建立了齿轮耦合的转子-滑动轴承系统的多自由度动力学模型,用数值方法研究了该系统的质量不平衡响应^[34]。盖玉先等用一与轮齿啮合点处的法线相重合的弹簧表示齿轮啮合传动过程中轮齿产生的弹性变形,分析了这一参数激励和强迫振动并存系统的稳定性^[35]。李华等在间隙函数为分段线性函数的单对齿轮系统非线性微分方程量纲统一化的基础上,用 Lyapunov 指数研究了系统的动力学行为,表明 Lyapunov 指数是判定齿轮系统非线性动力学性态的一种可靠的特征指标^[36]。王三民等以齿轮副啮合点间沿啮合线的相对位移为广义坐标,建立了计及摩擦、间隙及时变刚度等因素的直齿轮副非线性动力学模型,用变步长 Runge-Kutta 法求得系统的各类周期响应和混沌响应^[37]。孙智民等建立了受传递误差和时变啮合刚度激励的星型齿轮传动的间隙型多自由度非线性扭转振动模型,并用自适应变步长 Gill 数值积分方法进行了求解,讨论了各齿轮副啮合状态在非冲击、单边冲击以及双边冲击状态之间的转化过程和齿侧间隙的关系,从理论上分析了齿侧间隙对系统的稳态响应、动载荷等动态特性的影响^[38]。S. Theodossiades 等建立的非线性时变模型考虑了间隙非线性和啮合刚度的时变性,把齿轮系统作为一个非线性的参数激励振动系统加以研究^[39]。

从以上文献可以看出,在齿轮传动系统非线性动力学研究中,影响较大的问题主要有两个方面:由轮齿啮合刚度的时变性引起的参数振动问题和由齿侧间隙引起的间隙非线性振动问题。即同时考虑时变啮合刚度、齿侧间隙、齿轮啮合误差等非线性因素,建立考虑多对齿轮副并包含传动轴、支承轴承和负载等因素的多自由度齿轮系统模型。其研究重点是分析模型的建立、激励形式的确定、求解方法的选择、系统的动态特性,以及参数对动态特性的影响。

对齿轮系统动力学研究的目的是为了降低齿轮传动系统的动载荷及振动噪声,改善其动态性能。随着科学技术不断发展,产品结构的动态性能在各种工程领域中的要求日益提高。因此,为改善产品的动态性能而进行的结构动态修改工作也日益得到人们的重视。特别是近年来,结构的设计已由传统的静态设计逐渐转变为动态优化设计,以重量轻、体积小、性能好的结构来满足现代设备的需要,使产品在使用过程中既能满足强度、刚度及稳定性的要求,又具有较好的动态特性。结构动力修改技术及其理论与方法的研究受到了人们越来越多的重视。结构动力修改的工程含义有三个方面:计算模型的动力修改、结构动力修改正问题和结构动力修改逆问题。由于力学上的假设、简化处理等因素,通常所建立的有限元模型往往与实际结构有一定的差距,如质量矩阵中不能确切反映惯性力的分布、各构件(单元)间的连接简化、单元类型的选用、边界约束的处理、阻尼假设等,都与实际情况不完全相符;另外,计算机容量和运算速度,也限制了单元的过细划分和自由度数的设置,这些无疑使有限元法建立的数学模型往往不能完全准确地反映实际结构的动态特性。需要用从模态试验中获得的结构模态参数测试数据对有限元模型进行修正,以获得更接近于真实结构的计算模型的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,称其为计算模型的动力修改。结构动力修改正问题或称结构动力重分析问题,是指结构做了小修改后,如何在原结构模态参数已知的条件下,快速有效地获得改动后的结构模态参数。结构动力修

改逆问题是指若原结构动态特性不符合要求,如何修改结构物理参数及确定修改量,使其动态特性满足给定的要求。近年来被研究工作者和工程技术人员关注,并取得相当进展的逆特征值问题就可归属于这一范畴。一般来说,“动力修改”多指结构动力修改的逆问题^[40-43]。近年来,结构动力修改的研究发展很快,但至今没有广泛应用于工程实际。

顾松年对结构动力修改所涉及的若干问题做了综述与探讨,评价了一些典型的修改方法^[44]。目前,基于复频响应函数修改、双模态空间修改特别是基于灵敏度分析动力修改等方法已逐渐受到科研人员和工程师们的注意。复频响应函数修改法主要是从频响函数的综合修改着手,通过改变、增加或删除子结构来研究主结构的动力特性,包括通过改变质量、刚度等参数来观察、研究系统的动力特性,其缺点是研究中带有盲目性,很难用于较为复杂机械系统的修改。双模态空间修改法可利用原系统实验所得模态数据,在不同的模态坐标下通过计算得到修改后的模态数据,而不必重新做实验,这就为设计者选择较好的设计方案创造了条件。但对整个系统而言,双模态空间法却无法得出哪个结构参数能显著改变系统的特性(如特征值、特征向量)。而基于灵敏度分析的修改方法则弥补上述之不足,使修改成为有针对性、目的性、明确性的修改^[45-50]。

由于有限元方法和实验模态技术的快速发展,将二者结合可以建立正确有效的结构有限元模型。有限元模型具有诸多优点,尤其在结构设计阶段,可能只有有限元模型存在,因此研究基于有限元模型的结构动力修改很有必要。顾松年提出发展直接修改或通过设计变量来修改有限元模型的动力修改值得重视^[44]。唐小兵等对动力修改逆问题中基于有限元模型的修改法作了分析^[40]。S. V. Modak等提出可以利用修正后的有限元模型来预示动力修改结果,进行动态设计^[51-52]。但这些研究都尚未应用于工程实际,这方面的文献资料、研究成果也不多见。目前,人们进行结构动力修改,尚未充分利

用有限元模型来进行后续研究工作。因此,开展基于有限元模型的动力修改研究工作很有必要,值得重视。

20世纪90年代以来,国内的学者开始了对齿轮系统的结构动力修改问题的研究。沈允文等从建立齿轮系统的动力学模型出发,对齿轮系统的动态特性、减振设计和灵敏度等进行了全面的分析和研究^[53-57],为开展齿轮系统的动力修改工作提供了有益的理论依据。刘中生、陈学东和王灵等研究了齿轮传动系统扭振固有频率的设计灵敏度问题,推导了固有频率相对于设计参数的灵敏度公式^[58-60],设计参数可以是轴的扭转刚度、齿轮或轴上零件的转动惯量和各级齿轮副的传动比。魏兵等考虑了轴和轴承的柔性以及由于轮齿啮合而产生的横向运动、扭转运动、轴向运动与旋转(摆动)运动间的动态耦合的影响,建立了齿轮系统的动力学模型,研究了齿轮系统特征值灵敏度分析方法^[61]。杨建明、张策推导了行星齿轮传动的纯扭转振动模型,计算了系统的固有频率,分析了系统固有频率对齿轮啮合综合刚度及构件质量等设计参数的灵敏度^[62]。从上述文献可以看出,国内学者对齿轮系统结构动力修改问题的研究多集中在齿轮传动系统设计参数的灵敏度分析上,且对设计灵敏度的计算多采用纯理论的解析法计算。

1.3 本书研究内容

国内外众多学者在齿轮传动系统动力学特性分析及结构动力修改等齿轮系统动态设计相关领域作了大量研究。但就总体而言,目前还缺乏一套适用于工程应用的较完整的齿轮系统动态设计理论与方法。

本书基于机械系统动力学理论、模态及动力响应有限元分析方法以及实验模态测试技术,对齿轮系统的动态设计方法进行了研究,提出了一套在设计阶段对齿轮系统进行结构动力学建模,对其进行

动态特性、响应分析以及结构动力修改的具有实用价值的方法。研究内容如下:

(1)为建立包含传动系统与箱体两个子系统的齿轮系统整体动力学模型,研究了应用实验模态分析与有限元分析相结合识别齿轮系统轴承支承结合部动力学参数的方法,计算了齿轮系统轴承支承结合部横向弯曲及轴向振动方向的动力学参数。

(2)考虑时变啮合刚度、齿侧间隙、传动误差及啮合冲击等非线性因素,建立了一个二级斜齿轮传动系统的弯-扭-轴-摆耦合非线性动力学分析模型,并对该模型的动态响应进行了计算。

(3)建立了箱体动态响应分析的有限元计算模型。在传动系统动态响应计算及轴承支承结合部动力学参数识别的基础上,计算了齿轮箱的动态响应。

(4)对一个实际减速器进行了实验研究,得到了箱体表面的振动加速度分布,并与有限元计算结果进行了比较。

(5)定义了一种轮齿啮合刚度矩阵,推导了斜齿轮传动系统的轮齿啮合刚度矩阵。应用有限元法建立了考虑轮齿力的斜齿轮传动系统弯-扭-轴-摆耦合振动模型,计算了斜齿轮传动系统的耦合振动固有模态,并分析了轮齿啮合刚度及支承对系统动态特性的影响。

(6)研究了基于有限元的灵敏度分析及结构动力修改方法,探讨了一种可行的改善齿轮传动系统动态特性的灵敏度计算与结构动力修改方法。

1.4 本书章节安排

第1章 绪论。阐述了齿轮系统动态设计的概念及主要内容。介绍了齿轮系统动力学研究、非线性动力学研究,以及结构动力修改的发展历程、研究重点和研究现状。

第2章 齿轮系统结合部动力学参数识别。将齿轮系统划分为

传动系统与箱体两个子系统,研究了应用实验模态分析和有限元分析相结合识别齿轮系统轴承支承结合部动力学参数的方法。

第3章 齿轮系统动力学建模及耦合非线性动力分析。应用集中参数法建立了一种二级斜齿轮传动系统16个自由度的弯-扭-轴-摆耦合非线性动力学分析模型。推导了该动力学模型的微分方程和无量纲统一微分方程。利用Runge-Kutta数值积分法对推导出的二级斜齿轮传动系统16个自由度无量纲统一微分方程进行了求解。应用有限元法建立了箱体动态响应的计算模型,计算了箱体的动态响应。对实际减速器进行了实验研究,得到了箱体表面的振动响应分布,并与有限元计算结果进行了比较。

第4章 齿轮传动系统耦合动态特性分析。提出了轮齿啮合刚度矩阵的概念,应用有限元法建立了考虑轮齿啮合刚度的斜齿轮传动系统弯-扭-轴-摆耦合振动模型,分析了轮齿啮合刚度及轴承支承刚度对系统动态特性的影响。

第5章 基于有限元的齿轮传动系统结构动力修改研究。提出了一种基于有限元模型的齿轮传动系统结构灵敏度分析及动力修改的方法。

结束语 全书总结。

第2章 齿轮系统结合部 动力学参数识别

2.1 引言

产品是由多个零部件通过不同种类的装配关系连接而成的,连接处的结合面条件对结构性能,特别是动态性能的影响很大。例如有专家估计,一台机床90%以上的阻尼和55%的动柔度来自其装配结合部^[63]。所以,要想建立一个精确的产品动力学分析模型,进行结构的动力学分析,获得装配结合部的动力学参数(连接刚度与连接阻尼)是关键问题之一。

进行结合部动态特性的研究一直是动力学研究领域的难点之一,目前仍没有一套比较成熟的理论与方法。一般来说,结合部动力学参数识别方法大致有三类:解析法、实测结构传递函数法、将实测数据与结构各部件离散建模结合识别法。其中,解析法必须首先知道所识别结合面的实际结合条件以及该条件下结合面的特性参数,而这些特性参数又大都是无可实用的数据。因此,结合部特性参数一般无法用纯理论的解析法求解。实测结构传递函数法需要对实测传递函数求逆,有时稳定性不好^[64-67]。因此,利用理论与实验相结合的方法,将实测数据与结构各部件离散建模相结合,应该是研究结构结合部动力学参数的一种行之有效的办法^[68]。对典型结合部,如螺栓连接、铆接、焊接、轴承支承等,可采取分类制造不同装配结合部