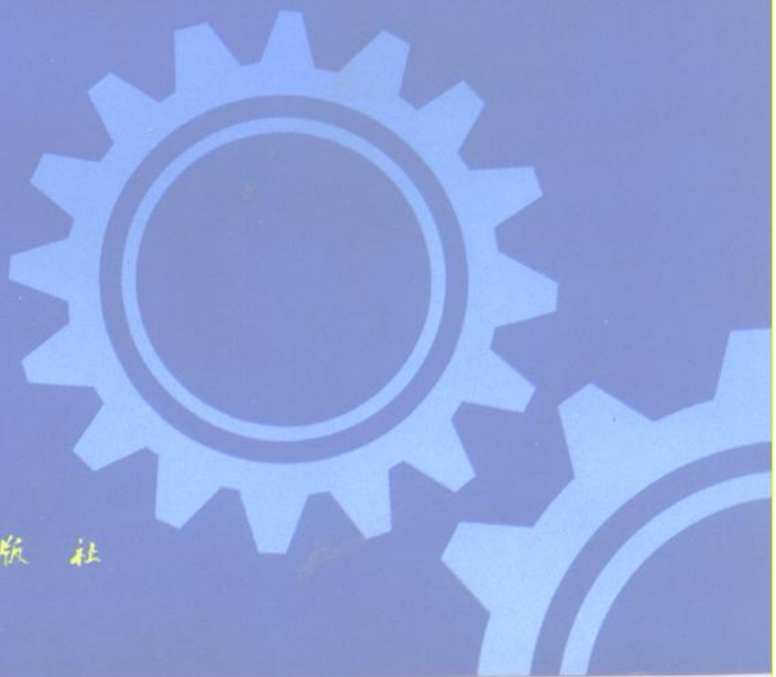


齿轮系统动力学

——振动·冲击·噪声

李润方 王建军 编著

国家自然科学基金资助项目



科学出版社



内 容 简 介

本书系统阐述齿轮及齿轮系统的振动、冲击、噪声分析和设计的基本理论及方法。主要内容有：齿轮动态激励机理、齿轮的动载荷和动载系数、齿轮系统的分析方法和分析模型、齿轮系统非线性动力学、齿轮系统噪声与控制、齿轮修形方法、齿轮系统的动态特性等。

DW02/06
图书在版编目(CIP)数据

齿轮系统动力学/李润方,王建军编著.-北京:科学出版社,1996

ISBN 7-03-005595-0

I. 齿… I. ①李… ②王… II. 齿轮传动-传动系-动力学 N. TH132.41

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第17670号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京科地亚印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1997年3月第一版 开本:850×1168 1/32

1997年3月第一次印刷 印张:15

印数:1—1500 字数:398 000

定价:25.00元

前 言

齿轮传动是最重要而且应用最广的机械传动。高速、重载、精密齿轮传动是国家重点科技攻关项目。齿轮传动系统的工作状态极为复杂,不仅载荷工况和动力装置多种多样,会出现由原动机或负载方面引入的外部激励,而且也会出现由时变啮合刚度、齿轮传动误差和啮入啮出冲击所引起的内部激励。我国自行开发的齿轮产品都存在着不同程度的振动和噪声问题,我国从美国卡特彼勒公司、P&N公司、德国利勃海尔公司等引进的工程机械以及ZF汽车变速箱等在消化吸收过程中都出现过振动、冲击、噪声高于国外产品的关键技术问题。

本书根据我们从事多项国家自然科学基金项目研究的成果,又参考了国内外有关技术资料,全面总结了有关齿轮系统动力学的基本理论和方法,系统地阐述了齿轮系统振动、冲击、噪声分析中的关键理论和技术问题。本书主要内容为:齿轮动态激励基本原理;动态分析模型的建立和求解方法;齿轮系统非线性动力学;齿轮系统振动和噪声的控制;齿轮系统的动态特性等。限于作者的学术水平,本书涉及的内容又比较多,面比较广,书中难免会有错误或不妥之处,谨请批评指正。

本书第一章由王建军、李润方编写,第三章、第四章由李润方编写,其余各章由王建军编写。全书由李润方统稿。在科学出版社编辑加工过程中发现的问题,王建军又对全书进行了订正。

本书系国家自然科学基金资助项目,也得到了机械传动国家重点实验室基金的部分资助。

李润方 王建军

1996年9月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 关于齿轮系统动力学	1
1.2 齿轮系统动力学的基本问题	4
1.3 齿轮系统动力学的应用及今后研究重点	9
第二章 齿轮啮合动态激励基本原理	11
2.1 激励的类型和性质	11
2.2 轮齿啮合综合刚度及其计算方法	18
2.3 轮齿啮合刚度动态激励基本原理	35
2.4 轮齿啮合误差动态激励基本原理	48
2.5 齿轮副啮合冲击的动态激励基本原理	59
第三章 动态分析模型的建立	69
3.1 引言	69
3.2 物理参数分析模型	73
3.3 模态参数分析模型	86
3.4 频率域分析和随机振动分析	97
第四章 分析模型求解方法	110
4.1 集中参数系统	110
4.2 连续分布参数系统及其数值解	126
4.3 非线性系统运动方程及求解方法	137
第五章 齿轮系统振动分析模型	154
5.1 齿轮系统扭转型分析模型	156
5.2 齿轮系统啮合耦合型振动分析模型	162
5.3 齿轮系统转子耦合型和全耦合型振动模型	180
5.4 齿轮系统动态子结构振动模型	188
第六章 齿轮系统参数振动力学	211
6.1 概述	211

6.2	齿轮系统动力稳定性分析	215
6.3	齿轮系统参数振动稳态响应分析方法	228
6.4	齿轮系统参数振动的基本性质	247
第七章	齿轮系统间隙非线性动力学	259
7.1	概述	259
7.2	单自由度“振-冲”系统的非线性振动	267
7.3	多自由度“振-冲”系统非线性振动理论	280
7.4	单自由度齿轮系统的间隙非线性振动	291
7.5	齿轮-转子-轴承系统的间隙非线性振动分析	318
7.6	汽车变速系统的拍击动力学	336
第八章	齿轮系统噪声及其控制	352
8.1	齿轮系统噪声发生机理	352
8.2	齿轮系统振动噪声计算与评价	355
8.3	齿轮系统降噪的现代分析方法	371
8.4	齿轮副的降噪设计	380
8.5	系统结构降噪设计	394
8.6	齿轮系统的被动降噪	400
第九章	齿轮系统动态特性	406
9.1	轮齿动载荷和动载系数	406
9.2	齿轮系统的固有特性	420
9.3	齿轮系统的动态响应	436
	参考文献	460

第一章 绪 论

1.1 关于齿轮系统动力学

齿轮系统动力学是研究齿轮系统在传递动力和运动过程中的动力学行为的一门科学。

齿轮系统包括齿轮副、传动轴、支承轴承和箱体,也可以包括与齿轮传动有关的联轴器、飞轮、原动机和负载等。齿轮系统中零部件结构及相互连接关系是一个复杂的弹性机械系统。

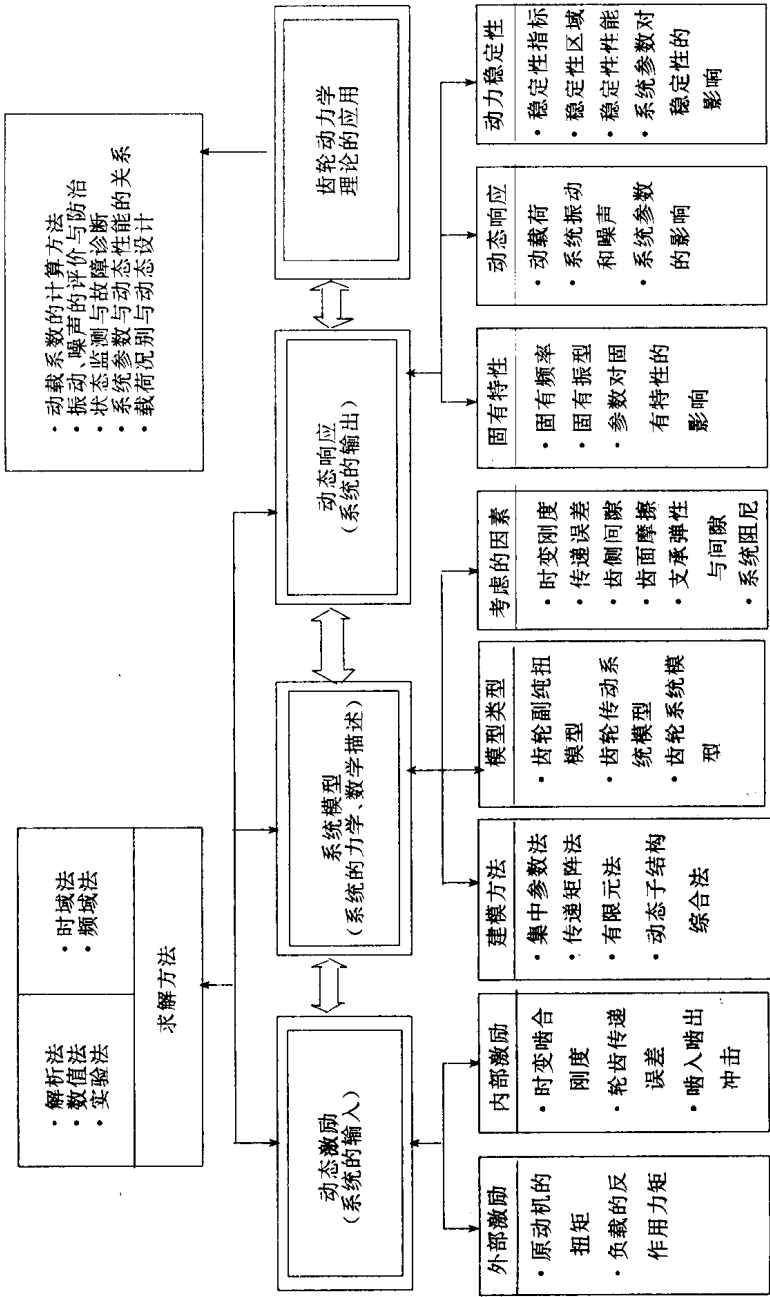
齿轮系统的动力学行为包括轮齿动态啮合力和动载系数,以及齿轮系统的振动和噪声特性等。通过齿轮系统动力学的研究,可以了解齿轮系统结构型式、几何参数、加工方法等对这些动力学行为的影响,从而指导高质量齿轮系统的设计与制造。

齿轮系统中动力和运动是通过轮齿共轭齿面间连续的相互作用而传递的,因此齿轮副啮合传动问题是其核心问题之一。

齿轮系统是各种机器和机械装备中应用最广的动力和运动传递装置,其力学行为和工作性能对整个机器有重要影响。因此,齿轮系统动力学问题近百年来一直受到人们的广泛关注,对此问题进行了大量深入的分析研究,取得了相当的进展,已经形成了一个完整的理论体系。如表 1.1 所示。

在分析理论方面,齿轮系统动力学起初是以冲击理论为基础,后来发展到以振动理论为基础。50 年代以前,人们以啮合冲击作为描述、解释齿轮动态激励、动态响应的基础,而将齿轮系统简化为较为简单的单自由度系统,用冲击作用下的单自由度系统的动态响应来表达齿轮系统的动力学行为。自 50 年代初期以来,人们将齿轮系统作为弹性的机械振动系统,以振动理论为基础,分析在

表 1.1 齿轮系统动力学理论体系



啮合刚度、传递误差和啮合冲击作用下系统的动力学行为,从而奠定了现代齿轮系统动力学的基础. 同时在振动理论的框架内, 齿轮系统动力学又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, 利用数值积分法计算系统的动态响应, 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的相互关系和相互作用对系统动态特性的影响. 而齿轮系统的非线性振动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, 把齿轮系统作为一种非线性的参数振动系统研究其基本理论、基本方法和基本性质. 在振动理论的框架内, 将啮合轮齿模拟成时变的弹性元件, 可以统一描述和研究轮齿啮合中刚度的时变激励、误差的周期性激励和冲击的瞬态性激励, 且这种弹性元件作为整个齿轮系统的一个组成部分, 可以在研究一个完整的弹性机械系统的过程中, 研究激励、系统、响应间的相互作用和影响, 从激励和系统行为的一致性方面研究系统参数与结构的优化选择与配置.

在分析系统方面, 齿轮系统动力学经历了由仅由一对齿轮副组成的简单系统向同时包含齿轮、传动轴、轴承和箱体结构的复杂系统的过渡. 这样, 利用整个齿轮系统作为分析对象, 可以全面研究齿轮系统的动态性能、研究齿轮啮合过程及系统其它零件对啮合过程动态激励的影响, 并可研究动态激励在系统中的传递特性和传递路线, 还可以同时研究轮齿动态啮合力、轴承支反力, 齿轮、传动轴和箱体的振动特性以及系统的振动噪声的产生、传播与辐射.

在分析方法方面, 齿轮系统动力学同时利用时域方法和频域方法, 并同时利用解析方法、数值方法和实验方法, 能够从多方面综合研究齿轮系统的瞬态特性、稳态特性和混沌特性.

1.2 齿轮系统动力学的基本问题

1.2.1 正问题和反问题

由表 1.1 可以看出,与一般机械系统动力学问题类似,齿轮系统动力学的基本问题也是激励、系统和响应三者间的关系问题,从性质上说,有正问题和反问题两类。

齿轮系统动力学的正问题,是研究在已知系统及其工作环境的条件下,分析、求解系统的动态响应,其中包括确定和描述动态激励的问题、确定和描述系统模型的问题,以及响应的求解问题。正问题是目前齿轮动力学主要研究方面。

齿轮系统动力学的反问题则是已知动态响应时进行载荷识别(确定轮齿动载荷)、故障诊断、模型的修正与精化等,涉及的范围较宽,但目前研究得较少,且主要集中在故障诊断方面。

1.2.2 齿轮系统的动态激励

激励是系统的输入,是进行系统动力分析的先决条件。因此也是齿轮系统动力学的首要问题。

齿轮系统的动态激励分为内部激励和外部激励两大类。外部激励是系统外部对系统的激励,主要指原动机的主动力矩和负载的阻力和阻力矩。外部激励的确定与一般的机械系统是相同的。内部激励是在齿轮副啮合过程中在系统内部产生的。内部激励问题是齿轮系统动力学研究的重点之一。

内部激励包括刚度激励、误差激励和啮合冲击激励。刚度激励表现为因啮合齿对数变化导致啮合综合刚度随时间周期变化而引起齿轮轮齿啮合力周期变化。刚度激励是一种参数激励,其力学效应使齿轮系统处于参数振动状态。这样,即使外载为零或为常量时,系统也会因刚度激励而产生振动。在某种意义上,正是齿轮系统的刚度激励,确定了其系统动力学的基本性质和基本特性,决定了进行分析研究所必须采用的理论和方法。刚度激励主要与齿轮

副的设计参数(模数、重合度、齿廓修形参数等)有关。因此,研究刚度激励及其与齿轮系统动态特性的关系,有助于改进齿轮传动系统的设计。

由齿轮加工、安装误差引起的齿廓表面相对于理想齿廓位置的偏移是齿轮系统的误差激励。误差激励是啮合轮齿间的一种周期性位移激励。研究误差激励对系统的影响、了解各种轮齿加工误差与系统动态特性的关系,可以为齿轮设计中精度等级的确定和加工方法的选择提供指导。

此外,由于轮齿的卸载变形和加工误差,轮齿在进入和退出啮合时,啮入、啮出点的位置会偏离理论啮合点,产生线外啮合,使啮合齿面间产生冲击,引起另一种激励——啮合冲击激励。这种激励与前两种激励的区别在于它是一种周期性的载荷激励。

值得注意的是,齿轮系统的内部激励的重要特性在于它的周期性,因此特别适于用频谱分析法研究。通过静传递误差描述周期性的内部激励,并作出静传递误差函数的傅里叶变换,进行谱分解,由此确定影响内部激励的主要因素,以便更有效地采取措施减少内部激励。

1.2.3 齿轮系统的分析模型和求解方法

只有建立了分析模型才能有效地对系统进行动力分析和动态设计。不同类型的模型应该采用不同的方法求解。

一、建立模型的方法

目前,建立齿轮系统分析模型的方法主要有传递矩阵法、集中参数法和有限元法等。

一般说来,齿轮系统可分成传动系统和结构系统两部分。传动系统是指由齿轮副、传动轴等组成的用于传递运动和动力的系统,结构系统则是指支承和保持传动系统正常工作的支座和箱体等。

对于传动系统,建模时可以采用传递矩阵法和集中参数法,也可以采用有限元法;对于结构系统则必须采用有限元法。因此,在建立整个齿轮系统的分析模型时,往往采用动态子结构混合综合

法的基本原理,综合运用多种建模方法.

此外,从本质上讲,齿轮系统是连续的弹性系统,上述的各种建模方法均是将这种连续的弹性系统简化为离散的弹性系统,因此所建立的分析模型均是常微分方程.

二、模型的类型

齿轮系统动力学中所建立的力学模型均是离散化的单自由度或多自由度模型,主要有以下几种:

(1) 动载系数模型

动载系数模型是在齿轮动力学研究的早期使用的单自由度模型,主要用来确定轮齿啮合的动载系数.

(2) 齿轮副扭转振动模型

这种模型以一对齿轮副为分析对象,不考虑齿轮的横向振动位移,假设支承是刚性的,模型的广义自由度是齿轮副的扭转振动.这种模型主要用来研究齿轮副的动态啮合问题.由于轮齿啮合动态激励的最直接结果是齿轮副的扭转振动,因此扭转振动模型也是齿轮系统动力学模型的最基本形式.

(3) 传动系统模型

传动系统模型是以齿轮系统中的传动系统作为建模对象,模型包含了齿轮副、传动轴,有时又可以包含支承轴承、原动机和负载的惯性.这类模型根据所考虑的振动形式(即广义自由度的性质)又分为纯扭模型和弯、扭、轴、摆等多类自由度相互耦合的耦合型模型,且耦合型模型中根据耦合性质的不同又可分为啮合耦合型、转子耦合型和全耦合型等多种形式.利用传动系统模型,不仅可以分析啮合轮齿的动载荷,而且可以确定系统中所有零件的动态特性及相互作用.

(4) 齿轮系统模型

这种模型同时以齿轮系统中的传动系统和结构系统作为建模对象.因此,这种模型是耦合型模型,可以在分析中同时考虑两种系统的相互作用,全面确定齿轮系统的动态特性,尤其适用于分析齿轮系统振动噪声的产生与传递.

在上述四类模型中,除动载系数模型外,其余三类均是目前常用的.其中齿轮副扭转振动模型最简单,常用于传动轴和支承系统刚度较大的齿轮系统的建模,主要用于研究轮齿啮合的动态特性;第四类齿轮系统模型最复杂,当需要全面研究系统动态特性时采用.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和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.

三、求解方法

齿轮动力学数学模型的求解方法主要有解析法和数值法两类.

关于解析法,根据分析模型的不同类型,应采用不同的求解方法.其中关键的问题之一是分析模型中时变参数(啮合刚度)和非线性参数(齿侧间隙)的简化、描述问题,关于数值法,则主要是各种数值积分法,如龙格-库塔法等.

按求解方法的性质,又可分为时域法和频域法.由时域法可得到系统响应在时域的描述,它可用以研究系统动态特性随时间的变化规律.频域法研究系统响应在频率域中的描述,用以阐明系统动态性能与各频率成分间的关系.特别是由于齿轮系统动态激励的周期性,系统在时域中的动态响应往往是稳定的周期性响应.因此,研究系统响应的频率结构,可有效地了解激励、系统与响应三者间的关系,更为方便实用.而且,目前各类频谱分析仪器和分析软件已普遍使用,这也为齿轮系统的频域分析提供了较好的条件.

此外,利用实验方法研究齿轮系统的动态特性也是极为重要的,目前主要用于:(1)利用实验结果验证理论分析的正确性;(2)利用实验数据精化和修正理论分析模型,以便更有效地利用计算机进行齿轮系统的动态设计.

1.2.4 齿轮系统的动态特性

齿轮系统动力学研究的目标,是确定和评价齿轮系统的动态特性,从而为设计高质量的齿轮系统提供理论指导.

一、固有特性

固有特性指固有频率和振型,是齿轮系统的基本动态特性之一,对系统的动态响应,动载荷的产生与传递,以及系统振动的形式等均具有重要意义。

目前,齿轮系统固有特性分析主要包括:利用集中参数方法研究齿轮传动系统的固有频率和振型;利用有限元方法计算齿轮轮体和箱体结构的固有频率和振型;利用敏度分析及动态优化设计方法研究系统结构参数和几何参数与固有频率和振型的关系,进行结构动力修改,提高和改善系统的固有特性。

二、动态响应

在动态激励作用下齿轮系统的响应是齿轮系统动力学研究的重要内容。主要包括轮齿动态啮合力和轮齿激励在系统中的传递以及传动系统中各零件和箱体结构的动态响应等,研究轮齿的动态啮合力,可以了解系统动态激励产生的机理、大小和性质,确定轮齿的动载荷和动载系数,对轮齿强度和可靠性设计具有重要意义。研究系统中动态激励的传递及各零件的动态响应,目的在于通过系统的设计修改,减小动态激励的传递、降低系统各零件的振动、减小支承轴承的受载、提高寿命、降低振动和噪声。

三、动力稳定性

齿轮系统是一种参数激励系统,与一般机械振动系统的重要区别在于它存在动力稳定性问题。通过齿轮系统动力稳定性的分析,评价影响稳定性的因素,确定稳定区与非稳定区,为齿轮系统的设计提供指导。

四、系统参数对齿轮系统动态特性的影响

在研究系统的各种动态性能时,重要的任务是研究齿轮系统的结构形式、几何参数等对这些性能的影响,特别是可以系统动力学模型为基础,通过灵敏度分析定量了解各类参数的灵敏程度,在此基础上进行齿轮系统的动态优化设计。

1.3 齿轮系统动力学的应用及今后研究重点

1.3.1 齿轮系统动力学的应用

一、动载系数的计算方法

动载系数是各种齿轮强度计算标准中用于考虑轮齿啮合力因系统振动而增大的定量指标. 随着齿轮系统动力学理论的发展, 动载系数的计算方法也不断发展. 采用更合理的振动理论基础和更简洁的计算方法以获到更可靠的计算公式, 一直是各国齿轮标准的重要目标.

二、振动和噪声的控制

随着人类社会的发展和科学技术的进步, 人们对机械设备的小振动、低噪声提出了越来越高的要求, 从而对齿轮传动系统也提出了更严格的要求.

齿轮系统动力学的研究, 即从动态激励、系统设计、响应特性三方面全面研究齿轮系统产生振动和噪声的机理、性质、特点和影响因素, 采取相应的措施降低齿轮系统的振动和噪声, 是齿轮系统动力学理论的主要应用领域之一. 在这方面人们已经进行了卓有成效的工作.

三、状态监控和故障诊断

齿轮系统作为机器设备的动力和运动传递系统, 其工作状态对整个机器设备的运行会有重要影响, 齿轮系统故障可能产生严重后果, 因此, 该系统的状态监控和故障诊断非常重要. 其中, 系统振动信号和噪声信号的测试和分析是一种主要的监测和诊断手段. 因此, 开展系统振动和噪声产生机理的研究有助于采用更可靠、更有效的状态监控和故障诊断方法.

1.3.2 齿轮动力学今后的研究重点

一、参数激励——非线性系统理论的研究

齿轮系统是一种参数激励和非线性并存的弹性结构系统, 应

从力学理论上深入研究多个参数激励源和多处非线性并存的力学振动系统,包括振动机理、求解方法、力学性质等,尤其应注意研究这类系统的频谱特性、模态分析方法等。

二、齿轮系统动态性能的研究

通过建立齿轮系统的分析模型,同时较为全面地考虑齿轮系统的结构参数、几何参数、制造参数,并在用实验数据精化和修正理论分析模型的基础上,应用计算机仿真技术全面研究齿轮系统在各种工况、各种系统、各种参数、各种加工方法下的动力学性能,从而指导齿轮系统的设计。

三、载荷识别的研究

研究齿轮系统动力学反问题,通过对动态激励机理及其传递过程的研究,由系统在工作状态的动态响应反过来识别轮齿啮合的动态激励。

四、故障诊断和状态监控理论与方法的研究

故障诊断和状态监控属于反问题的范畴,目前对齿轮系统振动、噪声的诊断和监控仍很不成熟,应进一步开展。

五、动态优化设计理论与方法的研究

把齿轮系统作为一种复杂的弹性结构系统,根据动态设计的思路,研究其动态优化设计的理论与方法是今后研究的重点和热点,只有这样,才能真正设计出高性能的齿轮系统。

第二章 齿轮啮合动态激励基本原理

齿轮传动系统作为一种弹性的机械系统,在动态激励作用下产生动态响应,动态激励是系统的输入.因此,研究齿轮啮合过程动态激励的基本原理,确定动态激励的类型和性质,是齿轮系统动力学的首要问题.

齿轮系统的动态激励有内部激励和外部激励两类,其中与一般机械系统的主要不同之处在于它的内部激励.

由于同时啮合齿对数的变化、轮齿的受载弹性变形、齿轮和轮齿的误差等引起了啮合过程的轮齿动态啮合力,因而即使外部激励为零(或为常值),齿轮系统也会受这种内部的动态激励而产生振动.

本章首先讨论齿轮啮合动态激励的类型,然后将主要讨论各种内部激励.

2.1 激励的类型和性质

齿轮传动系统的动态激励主要包括两方面,齿轮副轮齿啮合本身所产生的内部激励和系统的其它因素对轮齿啮合所产生的激励,后者称为外部激励.

2.1.1 齿轮副的内部激励

齿轮副的内部激励是指由齿轮副轮齿啮合过程中所产生的动态激励.

如表 2.1 和图 2.1 所示,齿轮副的内部激励包括三种形式:

(1) 刚度激励

一般说来,齿轮轮齿啮合的重合度大多不是整数,啮合过程中

同时参与啮合的齿对数随时间而周期变化,因而轮齿的啮合综合刚度是随时间周期变化的. 这样,如图 2.1 所示,弹性的啮合轮齿可以简化成为沿啮合线方向的时变弹簧. 设弹簧的刚度为 $k_m(t)$, 则相应的轮齿啮合力 F_k 可表示为

$$F_k = k_m(t) [y_p(t) - y_g(t)] \quad (2.1)$$

式中 $y_p(t)$ 和 $y_g(t)$ 分别为主、被动齿轮基圆上一点的线振动位移.

表 2.1 齿轮副的内部激励

齿轮副内部激励的类型		
刚度激励	误差激励	啮合冲击激励
由啮合刚度的时变性产生 [图 2.1(a)]	由齿轮误差的时变性产生 [图 2.1(b)]	由啮入啮出冲击产生[图 2.1(c)]

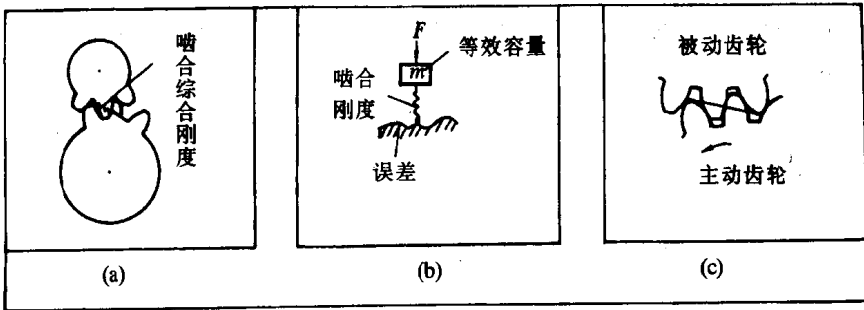


图 2.1

由以上的分析可知,刚度激励是因啮合综合刚度的时变性产生动态啮合力并对系统进行动态激励的现象.

从性质上来说,刚度激励使齿轮系统的动力学方程(分析模型)中含有时变系数,因而齿轮系统动力学问题属于参数激励的范畴. 这实际上构成了齿轮系统动力学的最主要的属性,形成了齿轮动力学的基本特点和性质,决定了它的研究和求解方法.

(2) 误差激励

齿轮和轮齿的加工和安装不可避免地会存在误差,啮合齿廓