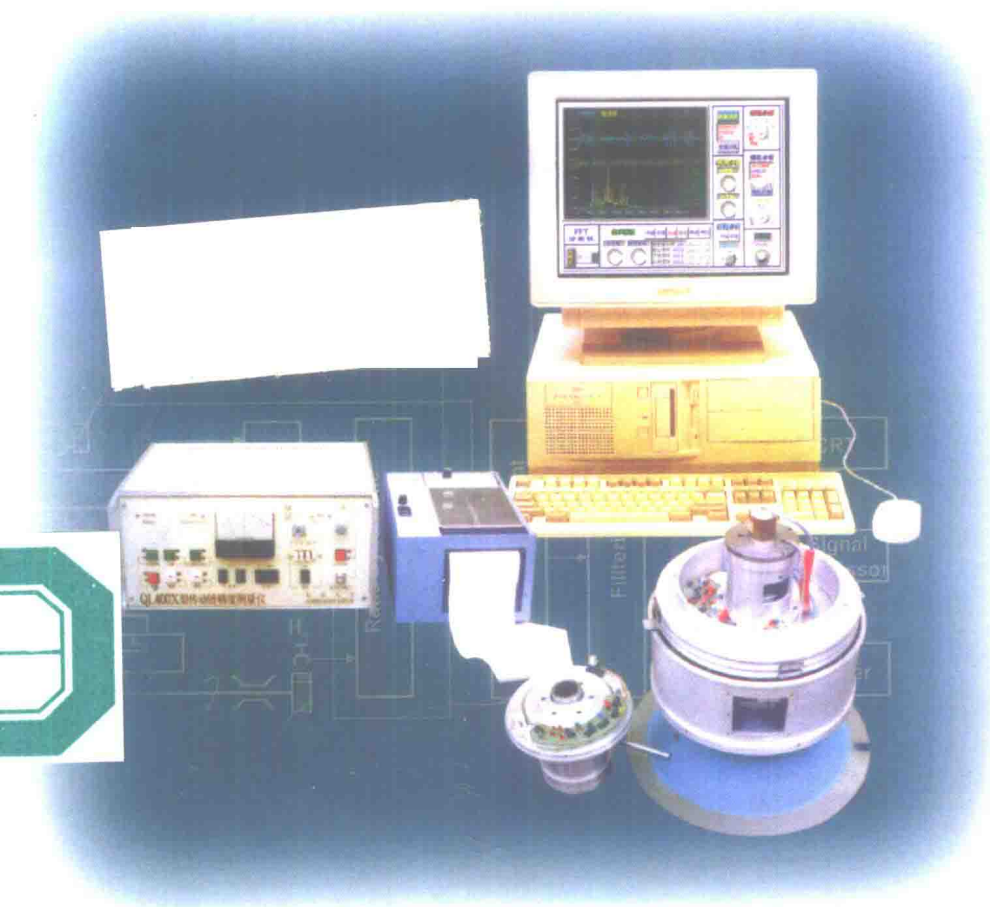


齿轮传动系统检测 与诊断技术

秦树人 著



重庆大学出版社

国家“九五”重点图书
《机械传动技术》丛书

齿轮传动系统检测与诊断技术

秦一著

江苏工业学院图书馆

国家自然科学基金资助项目
藏书章

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

齿轮传动系统检测与诊断技术/秦树人著. —重庆:
重庆大学出版社, 1999. 12
(机械传动技术丛书/李润方主编)
ISBN 7-5624-2097-1

I. 齿… II. 秦… III. ①齿轮传动装置-检测②齿
轮传动装置-故障诊断 IV. TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 52985 号

齿轮传动系统检测与诊断技术

秦树人 著

责任编辑 李淑芳

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

四川外语学院印刷厂印刷

*

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 6.625 字数: 178 千

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1 - 1000

ISBN 7-5624-2097-1/TH·75 定价: 15.00 元

出版说明

机械传动国家重点实验室建室以来坚持了应用基础研究的正确方向,致力于解决机械传动中的关键科学技术问题,在若干主要方面取得了突出进展,成果显著。1993—1997年共获部省级科技进步奖15项,承担国家级课题19项、部省级课题25项,在国内外共发表论文314篇,1997年通过了国家计委、国家科委委托国家自然科学基金委员会组织的全国性评估。与此同时,重庆大学机械工程学科的有关专业也取得了丰硕的成果。《机械传动技术》丛书是以这些科研成果为基础,同时又引用了国内外齿轮界的有关研究成果,由有关专业的教授、专家分别编写组集而成的。

《机械传动技术》丛书编委会对组成这套书的书目进行了认真审查;各书的编撰工作由编写者负责,并享有相应的知识产权。重庆大学出版社负责组织专家审稿及编辑出版工作。

本套丛书系国家“九五”重点图书,其中有些书涉及的有关研究工作得到国家自然科学基金委员会的资助。

重庆大学出版社全力支持本套丛书的出版。从选题申请、确定书目、组织稿件到编辑出版都付出了辛勤劳动。出版社在资金上给予支持,组织编印发力量,切实保证丛书的质量。在此谨致以衷心感谢。

本套丛书中的各册将陆续出版。在有关书籍中将分别介绍当代机械传动原理、结构、设计理论与方法、制造工艺以及故障诊断与测试技术等。

由于本套丛书涉及面广,限于作者的水平,难免会有不妥甚至错误,谨请批评指正。

《机械传动技术》丛书编委会副主任委员

机械传动国家重点实验室学术委员会副主任

李润方

1998年7月

前 言

本书收入国家“九五”重点图书《机械传动技术》丛书。

笔者 20 世纪 90 年代初期和中期,先后承担了两项有关传动系统动态精度测试的国家自然科学基金资助项目:“大型传动系统动态测试新方法 with 装置”和“小型高速齿轮传动链精度检测的研究”,取得了圆满的结果,受到同行专家的好评,并获得了国家级奖励的殊荣。本书是在这两项基金项目成果《研究报告》的基础上补充撰写而成。

本书旨在比较全面地介绍齿轮传动系统(如齿轮加工机床和大型机械式仪器的传动链、传动副等)的精度检测、故障诊断和精度诊断技术,并从传动系统动态测试的内涵出发,详细介绍传动系统动态测试的对象、内容和现代化测试方法与仪器装置。

本书共 7 章,系统地介绍传动误差的建模、传动误差的分析、传动链精度的检测与仪器装置、传动误差的数据处理、传动链精度诊断和动态特性识别,以及齿轮传动箱的故障诊断等。本书中的许多内容是作者的研究成果,例如传动误差的时序建模、传动系统动态特性的识别,特别是第 5 章中介绍的 QL 型传动精度测量装置,采用了作者经过近 10 年的苦心研究后发明的一种最新测量方法。这种方法的理论基础是作者提出的双行波传感原理和传动比电轴变换原理。QL 型传动精度测量仪器克服了同类测量仪器的缺点,成为自 20 世纪 70 年代以来大型、高精度、低速度传动系统动态精度测量最好的方法和仪器,曾先后获得国家、省部级的多项

奖励和发明专利。

本书参考过的主要文献全部列于书末,以备读者查阅。

作者的学生刘英、何玮、曾国英参加过本书中部分内容的研究工作,特此说明。

秦树人

1999 年 2 月

目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 齿轮传动系统动态测试的内涵	1
1.1.1 具内联系齿轮传动链	1
1.1.2 不具内联系的齿轮传动系统	2
1.1.3 系统动态特性的识别与分析	2
1.2 传动系统传动误差的概念	3
1.2.1 传动误差的意义	3
1.2.2 传动误差的动态模型	5
1.3 传动误差检测装置概述	5
1.3.1 传动误差检测装置的发展历史	5
1.3.2 检测装置的分类	7
第 2 章 传动误差的建模分析	9
2.1 传动误差的物理意义	9
2.2 传动误差数学模型的建立	9
2.2.1 建模的含义及其准则	9
2.2.2 传动误差的数学模型	10
2.3 传动误差的时序模型	13
2.3.1 几种常用的时间序列模型	13
2.3.2 适于表示传动误差的时间序列模型	14
2.3.3 三种时间序列信号模型的联系与适用性	16
第 3 章 传动误差的分析方法	19
3.1 傅里叶变换法	19

3.1.1	BT 法	20
3.1.2	周期图法	23
3.1.3	谱估计性能分析	24
3.2	现代谱分析法	24
3.2.1	最大熵谱估计	25
3.2.2	自回归 (AR) 分析法	26
3.2.3	自回归平均滑动 (ARMA) 分析法	27
第 4 章	传动误差的数据处理	31
4.1	FFT 谱估计	31
4.1.1	数学表达式	31
4.1.2	极大能量最佳谱窗	31
4.1.3	计算流程	32
4.2	最大熵谱估计	33
4.2.1	参数估计	33
4.2.2	阶数的确定	36
4.2.3	信号频率及幅值的估计	37
4.3	ARMA 谱估计	39
4.3.1	参数估计	39
4.3.2	ARMA 模型的定阶	44
4.3.3	功率谱密度的计算和频率的估计	46
4.4	计算机模拟分析	47
4.4.1	Burg 算法与 Marple 算法的比较	47
4.4.2	FFT 谱与 Marple 谱的比较	51
4.4.3	Marple 谱与 ARMA 谱的比较	53
4.5	时间序列的预报和补偿方法	54
4.5.1	AR 序列的预报方法	55
4.5.2	预报补偿系统的构成	56
4.5.3	计算机模拟补偿	56

第 5 章 齿轮传动链传动精度检测及其装置	60
5.1 触发式相位计	60
5.1.1 调相式传动误差	60
5.1.2 触发式相位测量原理	60
5.2 绝对式传动精度检测装置	66
5.2.1 装置的基本原理	66
5.2.2 传感器的安装调整	68
5.3 倍分频式传动精度检测装置	71
5.3.1 装置的工作原理	71
5.3.2 倍频与分频	72
5.4 差频模拟式传动精度检测装置	75
5.4.1 装置简述	75
5.4.2 装置的工作原理	76
5.4.3 测量过程的误差频率分析	79
5.5 带辅助挂轮的差频式检测装置	80
5.5.1 装置的工作原理	81
5.5.2 测量信号的频率分析	83
5.6 大型传动系统传动精度检测的新方法 与装置——QL 系统*	85
5.6.1 概述	85
5.6.2 系统的组成	86
5.6.3 系统工作原理	92
5.6.4 数据处理系统	95
5.7 螺纹式传动精度检测装置	99
5.8 其他类型的传动精度检测装置	101
5.8.1 旋转惯性式传动链精度检测仪	101
5.8.2 高速小型传动链精度检测装置	105

第 6 章 齿轮传动链的精度诊断与动态特性识别	108
6.1 精度诊断的基本内容	108
6.1.1 误差数据的预处理	108
6.1.2 数据处理	111
6.1.3 误差故障诊断	120
6.2 检测装置在精度诊断中的应用	122
6.2.1 传动精度的检测	122
6.2.2 时域诊断实例分析	131
6.2.3 频域诊断实例分析	138
6.3 传动系统动态特性识别	149
第 7 章 齿轮传动箱故障诊断技术	156
7.1 齿轮箱常见的几种故障	156
7.1.1 制造齿轮时造成的异常	156
7.1.2 装配齿轮时造成的异常	157
7.1.3 齿轮在运行时产生的损伤	158
7.2 齿轮箱振动故障的特征信息	158
7.2.1 啮合频率及其各次谐波	158
7.2.2 隐含成分	159
7.2.3 由调制效应产生的边频带	160
7.2.4 附加脉冲	164
7.2.5 交叉调制成分	165
7.3 齿轮箱故障诊断法	165
7.3.1 啮合频率及其各次谐波的分析	165
7.3.2 边带分析	167
7.3.3 细化(选带)分析	169
7.3.4 倒频谱分析	173
7.3.5 解调分析	174
7.3.6 测试诊断实例	179
参考文献	199

第1章 概 论

1.1 齿轮传动系统动态测试的内涵

对于齿轮传动系统,若是具内联系的精密传动链,其测试的核心问题是传动链动态精度的测量;若是不具内联系的齿轮箱,则振动、噪声或扭振是其测试的基本问题。从信号分析的观点来看,它们都是获取时域特征信息(传动链误差时域样本和齿轮箱振动时域样本);从动态系统的观点看,它们是测取系统的动态响应。对于这两种不同齿轮传动系统的动态测试内涵,下面分别加以说明。

1.1.1 具内联系齿轮传动链

(1) 传动链的动态精度测试

将传动链系统用图 1-1 的简化模型表示。

图 1-1 中 $x(t)$ 表示传动系统的激励,包括链内由各传动件如齿轮、蜗轮、蜗杆、轴系等的加工误差和装配误差引起的周期激励,

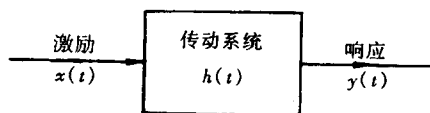


图 1-1 传动链系统简化模型

传动链在运行中传动件的扭转振动和冲击激励,以及由于电网电压波动、传动件瞬时运行不稳定引起的随机激励等。显然, $x(t)$ 一般不可预测。 $h(t)$ 为系统时域动态特性,它由传动链的结构决定。 $y(t)$ 为系统的动态响应,对传动链而言,它就是传动链的动态误差,亦即对系统进行测试的对象。

测取传动系统的响应 $y(t)$, 是系统动态测试的第一个重要内

容。它不仅为传动链精度的时域分析和评价提供了依据,也为后续进行的分析处理提供了时域样本。

(2) 误差的时域分析与处理

用数据处理技术对误差样本进行时域统计处理,获得传动系统在时域的特征值,则可对系统的精度作出评价。若继续对系统时域误差进行相关分析,则可以确定误差的性质。

(3) 误差的频域分析

用信号分析中的谱分析技术把系统的时域误差变换至频域进行频谱分析,将分析所得的谱图与传动链各传动件在一定工况下的转速档案进行对比分析,则可准确地找出链内的故障部位和各传动件误差对全链总误差的贡献大小,从而实现了对传动系统的诊断,这种诊断技术称为“精度诊断”。

1.1.2 不具内联系的齿轮传动系统

对于不具内联系的齿轮传动系统,如机床、机器设备中的齿轮箱等传动设备,其测试的基本内容为:振动时域信号 $y(t)$ 的测量,信号的时域、幅值域、频域等的分析处理,从提取征兆、特征值计算、数据处理与分析着手,掌握传动系统当前的工作状态,制定维护、修理的决策和计划。

1.1.3 系统动态特性的识别与分析

利用已测到的响应函数 $y(t)$,经信号分析处理,再用由专用软件支持的微计算机进行计算分析,可识别出传动系统的动态特性(即传递函数)。

一个完整的传动系统动态测试过程,可用图 1-2 表示。

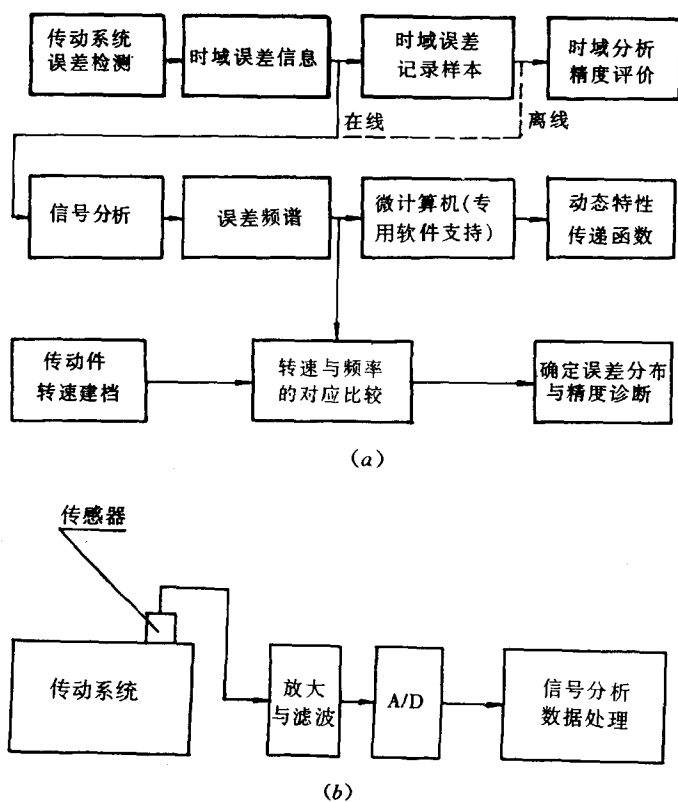


图 1-2 传动系统动态测试全过程

(a) 传动精度检测与分析

(b) 传动系统振动测试与故障诊断

1.2 传动系统传动误差的概念

1.2.1 传动误差的意义

一般来说, 齿轮加工精度取决于加工机床的几何精度、刚度、

热变形,刀具质量、齿轮毛坯质量及其安装精度、机床传动链精度以及机床的扭振动力特性等。在所有这些因素中,以机床传动链精度的影响最为明显。在齿轮加工中,要加工出高精度的齿轮,要求齿轮加工机床的刀具与工作台之间有准确的速比关系,而准确的速比关系是由机床的分度传动来保证的。因此,长期以来传动链的传动误差一直是人们感兴趣的问题。

齿轮切削加工时,表面的形成是靠刀具与工件按一定的规律作相对运动来实现的,这种有规律的相对运动是由机床内的分度传动系统来保证的。由于组成传动系统的各个传动环节必然具有的制造和安装误差,使得刀具与工件的瞬时的相对位置发生变化,因此形成的表面难以达到理想的精度要求。为了说明这一问题,我们对传动误差的意义作以下说明。

齿轮加工机床分度传动系统传动误差定义为:工作台实际相对于刀杆轴的运动与理论上相对于刀杆轴运动的偏差。工作台理论的旋转角位移由刀杆轴实际的旋转角位移和理论传动比决定。

由此定义可以看出,凡是影响刀杆轴到工作台传动比的因素都对传动链误差产生影响。很明显,传动链就是通过其两端传动比变化的大小和规律反映出传动误差的大小和规律的。检测传动链的传动误差(或传动精度),实质上就是测量传动链始末两端传动比的瞬时变化大小和规律。因此,我们可以用瞬时传动比的概念来描述齿轮传动系统的传动误差。

假设 θ_1 、 θ_2 分别为传动系统始末两端高、低转速轴的旋转角位移, ω_1 和 ω_2 为两端的旋转角速度。

(1)传动链始末两端转速 ω_1 和 ω_2 的瞬时值为恒量,即 ω_1 和 ω_2 均保持不变,有

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{d\theta_1}{dt} = \text{恒量} \\ \omega_2 &= \frac{d\theta_2}{dt} = \text{恒量} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

(2)传动链两端的瞬时传动比为恒量,即

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d\theta_1}{dt} / \frac{d\theta_2}{dt} = \text{恒量} \quad (1-2)$$

以上两种情况中的任意一种成立,我们说该传动链无传动误差。但是由于加工制造以及安装中的误差,上述两式不可能成立,所以传动系统总是存在或大或小传动误差的。

1.2.2 传动误差的动态模型

在机床加工中传动系统受到的激励主要有两类:一类具有周期误差的特点,它是由传动系统内部各传动元件的制造、安装、装配几何误差,大惯量元件不平衡等因素产生的激励;另一类具有随机信号的特点,它是由电源电压波动引起的转速波动以及外界的各种瞬态和随机干扰产生的。这些激励作用于传动链,产生了机床的传动误差。对于机床传动链的综合运动误差计算,早在 20 世纪 30 年代就有人提出过子值等权均方根综合运动误差公式,即

$$\Delta\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_i)^2} \quad (1-3)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——传动链均方传动误差;

$\Delta\sigma_i$ ——各传动件的均方传动误差。

显然,式(1-3)没有考虑到传动链中每个回转传动件的误差并不是都按 1:1 的比例反映到传动链的末端件的。为了提高传动链的传动精度,若逐个提高传动链中所有传动件的精度,必将造成极大的浪费。20 世纪 40 年代,前苏联不少学者提出了比较确切的概念,引入了传动比的影响因素,对这一问题将在以后详细论述。

1.3 传动误差检测装置概述

1.3.1 传动误差检测装置的发展历史

在齿轮传动系统的动态测试中,一个首先需要解决的问题就

是齿轮传动链动态精度即动态响应的检测。本节将就国内外对这一问题的研究情况作一个简单的回顾。

传动系统的动态精度检测始于 20 世纪 50 年代末期,世界著名的捷克斯洛伐克专家 ě.Štěpánek 首先研制成功一种用于齿轮加工机床传动链动态精度检测的磁栅式检测装置。20 世纪 60 年代初期,英国 NEL 的 C.Timmc 利用莫尔条纹效应研制成功计量光栅,同样成功地实现了滚齿机传动链精度的动态检测。这两类检测装置除计量传感器各异外,系统的工作原理基本相同。20 世纪 60 年代初期,美国以其研制成功的感应同步器配置相应的检测系统,也成功地实现了齿轮机床传动误差的测量。几乎在同一时期,联邦德国 Ahen 工业大学的 H.Opitz 提出了一种不同于上述两种装置原理的旋转惯性式传动链精度检测法。以这一方法研制的检测装置以其系统稳定可靠、分辨率高、安全方便等优点,在世界上获得了较高的声誉。

上述几类检测装置由于受系统频响的限制,只适用于中等规格机床传动精度的检测,而对于大型、超大型、极低速、大传动比的齿轮传动系统的动态精度检测却无能为力。20 世纪 70 年代初期 ě.Štěpánek 又发明了一种差频辅助挂轮式检测系统,在世界上首先解决了极低速、大传动比的传动精度检测问题。但是由于辅助挂轮引入检测装置产生了一系列缺陷,致使这项具有突破性的检测方法在以后的应用中逐渐沉寂了下来。针对 ě.Štěpánek 系统的缺陷,本书著者在 20 世纪 80 年代从检测机理的研究入手,提出了一种全齿栅双行波电轴变换式新方法,并据此新原理研制成功一种全新的检测装置——QL 系统。它不仅结构简单,而且几乎完全克服了 ě.Štěpánek 系统的缺陷,真正解决了超低速、大传动比的大型传动系统传动精度的检测问题。

综上所述,前面介绍的各种检测方法都为提高齿轮加工机床、齿轮传动系统的传动精度和深入研究传动系统的动态性能提供了先进的科学方法和现代检测手段。