

失配渐开线圆柱蜗杆传动的弹性啮合分析、加工仿真及相关技术的理论与试验研究*

苏代忠 陈兵奎 秦大同 陈小安 彭泽良 王 剑

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 综合应用多项先进技术,进行失配蜗轮副的理论与试验研究,包括虚拟制造蜗杆蜗轮,齿接触的计算机三维动态模拟,应用弹性啮合原理进行载荷变形下的齿接触分析,应用人工神经网络和基因遗传法优化传动参数,试验验证模拟和分析结果。以提出符合失配蜗轮副啮合特性,适于实际应用的强度分析和优化设计方法。研究对象以渐开线圆柱蜗杆蜗轮为主。并对渐开线失配圆柱蜗杆传动的传动效率和工作温度试验结果进行了分析,说明了失配蜗轮副优于线接触蜗轮副的原因。

关键词: 蜗杆传动 弹性力学 齿轮啮合原理 加工仿真 人工智能

中图分类号: TH132

0 前言

为了降低对制造、装配等误差的敏感性,失配蜗轮副已经广泛地被工业界接受。但是,由于蜗杆传动啮合的复杂性,虽然科技工作者作过不少努力,但迄今仍无符合失配蜗轮副啮合状态、适于实际应用的强度分析和优化设计方法。研究结果将解决这一问题。这对正确使用蜗轮副,提高设计质量,降低成本,节省生产时间等等都是十分重要的。蜗杆传动是基本机械零件,大量、广泛地用于各种机械,例如,食品机械、运输工具、国防器械、机床、舰艇、飞机和电梯,等等,因此,研究具有重要的实际意义。

渐开线圆柱蜗杆传动在西方先进工业国家(例如,英国、德国、瑞士)已大量生产使用。我国虽然也生产使用这种蜗杆传动,但生产方法、设计标准比较混乱,因此,急需一个先进的设计方法,并且能有效地进行优化设计。

基于上述情况,在国家自然科学基金的支持下,我们正在进行一项关于弹性啮合蜗轮副虚拟制造及相关技术的研究。该研究综合应用多项先进技术,包括弹性啮合原理、加工仿真、计算机三维动态模拟、人工神经网络、基因遗传法和试验技术来进行失配蜗轮副的理论与试验研究,以提出符合失配蜗轮副啮合特性,适于实际应用的强度分析和优化设计方法。研究对象以渐开线圆柱蜗杆蜗轮为主,但基本方法适于其他蜗轮副。

1 研究内容概述

主要研究内容包括以下几项。

(1) 计算机三维动态模拟实际工况(包括弹性变形,制造装配误差等)下失配蜗轮副的啮合状态。

(2) 基于上述模拟,提出一套适于实际应用的新技术进行强度计算、啮合分析、载荷下的传动误差评估以及蜗轮副主要参数的优化设计。

(3) 试验验证计算机模拟及所提出的新技术的正确性。

齿接触轨迹分析是蜗杆传动啮合原理研究中的一个主要内容。目前的研究都是把齿作为刚体来分析。实际上,由于受载后,齿发生弹性变形,齿的实际接触轨迹与刚体分析结果有很大差异。载荷下弹性变形后的齿接触分析,在其他齿轮上的研究(例如渐开线圆柱齿轮、伞齿轮)有所报道,但尚未见蜗杆传动方面可信的分析结果。将应用弹性啮合原理分析载荷下弹性变形后的齿接触轨迹,这是蜗杆传动研究方面的一个前沿课题。

有限元分析已经作为一个重要手段应用于蜗杆传动的研究中。但是,由于一些技术方面的限制,目前的研究有局限性,例如,Litvin等^[1]用只有一个齿的齿圈来作为蜗轮的有限元模型,然后把所得结果再推广到多齿对,这显然不能准确地反映真实情况;Qin^[2]和Su^[3]等虽然用了多齿对,较之Litvin等^[1]的模型进了一步,但蜗杆蜗轮都是局部模型,因此要对边界条件进行假设,这样,所得结果难免不带有局限性。与已有的研究不同的是,有限元模型是采用蜗轮蜗杆的整体模型,而不是局部模型;为了解决由此带来的大量占用计算机内存的问题,则

* 国家自然科学基金(50175112)和长江学者奖励计划资助项目, 20020828 收到初稿, 20021016 收到修改稿

采用先进的分级子模型技术。由于是整体建模，避免了由假设边界条件引起的误差，从而更接近真实情况。

蜗轮蜗杆的接触区情况，通常是用真实蜗轮副检验的，这是费工费时的。虽然亦可数值求解，但结果并不直观。应用先进的 CAD/CAM 软件，仿真蜗轮蜗杆的加工，进行接触区的三维动态模拟，并可模拟装配误差下的接触状态。这种方法直观、经济，大大提高了设计质量和速度。

由于绝大多数啮合原理计算公式是层层嵌套、递进表达的，因而用传统的数学方法是很难优化蜗杆传动参数的，这是为什么迄今为止，通过检索尚未发现这方面的文献。对上述的仿真加工蜗轮蜗杆、三维动态模拟方法，亦不可能用传统的数学方法优化传动参数。为解决这一问题，应用人工神经网络和基因遗传法，解决蜗杆传动设计参数的优化问题。通过文献检索，目前尚未发现将这两项人工智能技术应用于蜗杆传动的研究。

2 关键技术

研究涉及齿轮啮合原理、弹性理论、有限元分析、CAD、计算机加工仿真、计算机三维动态模拟、人工神经网络、基因遗传优化法和试验研究等多方面。现将有关的关键技术简述如下。

2.1 蜗杆蜗轮加工仿真及接触区的计算机三维动态模拟分析

首先，建立失配蜗轮副的三维 CAD 模型。与传统建模方法不同，模型是在三维 CAD 环境中，模拟刀具的切削过程建立的：首先给出蜗杆刀具的几何形状，然后按照刀具与蜗杆的运动关系，用刀具虚拟加工出蜗杆；同理，用已得到的三维蜗杆模型作为滚刀，按照滚刀与蜗轮的运动关系，虚拟加工出蜗轮。适当调整滚刀的尺寸和位置，即可得到与标准蜗杆相配的失配蜗轮三维 CAD 模型。此法免去了繁琐的数学推导，特别是在仅知蜗杆刀具的几何形状的条件下，即可建立蜗杆蜗轮的三维 CAD 模型。

用建立的三维 CAD 模型来模拟蜗杆蜗轮的共轭转动，并显示同时进入啮合的各对齿的接触区的变化，每对齿从进入啮合到退出啮合的全过程中，接触区在齿面上的动态变化均可形象地由三维 CAD 模型显示出来。对于不同设计参数，可有相应的 CAD 模拟。通过变化蜗杆和蜗轮的相对位置，可模拟各种误差。

计算机仿真加工蜗杆蜗轮、接触区的计算机三

维动态模拟分析部分的工作，将应用 CAD/CAM 软件 Pro/Engineer 来完成。Pro/Engineer 中的 Manufacturing mode 用来完成蜗杆蜗轮的仿真加工，而三维动态模拟将在 Design mode 中进行。Pro/Mechanica 的力学分析部分亦考虑应用。同时，要尽最大可能应用参数化设计，以提高程序质量，缩短编程、运行时间。

2.2 应用弹性啮合原理进行载荷变形下的齿接触分析

啮合原理的数学建模工作用 MathCAD 软件完成。该软件不仅有数值分析、计算的功能，并且具有知识推理的功能，还可以方便的把结果用图表、曲线图等表示出来。因此，简单的二维图形工作亦可在 MathCAD 中完成。

载荷变形下的齿接触分析应用三维有限元完成。与已有的研究不同的是，有限元的模型是采用蜗轮蜗杆的整体模型，而不是局部模型；为了解决由此带来的大量占用计算机内存的问题，则采用先进的分级子模型技术。由于是整体建模，避免了由假设边界条件引起的误差，从而更接近真实情况。研究内容包括：啮合刚度、多因素(载荷、弹性变形、弯曲变形和制造装配误差等)综合条件下的传动误差、接触应力、弯曲应力、齿间载荷分配和齿面载荷分布。

载荷变形下的齿接触分析部分的工作，主要应用有限元分析软件 ANSYS 完成。Pro/E 中的工作完成后，将三维模型传到 ANSYS 中来，经网格划分后，进行有限元分析。要考虑参数化建模和分析的最佳方法，以减少时间，提高建模和分析速度。

2.3 应用人工神经网络建立传动参数与失配参数的关系，设计参数与有限元分析结果的关系

蜗轮副的传动参数(蜗杆头数、传动比和模数等)与取得好失配效果的失配参数(失配滚刀尺寸、滚刀安装角度、失配蜗杆升角与节距等)之间的关系无法用数学式表述，只能按经验摸索。应用人工神经网络建立传动参数与失配参数的关系：首先，给出一组传动参数，用第 2.1 节给出的接触区的计算机三维动态模拟方法确定最佳失配参数；同理，对多组传动参数确定各自对应的最佳失配参数。然后，用所得一系列的传动参数/最佳失配参数组合来训练人工神经网络：人工神经网络的输入端的神经元为传动参数值，输出端神经元为对应的已知失配参数值。经过这样训练的人工神经网络就具备了确定传动参数/最佳失配参数的关系的功能。在输入端任意输入一组传动参数，输出端就得到对应的失配参数。

有限元计算是一项费工费时的的工作，应用人工

神经网络来建立设计参数与有限元分析结果的关系: 人工神经网络的输入端的神经元为设计参数(包括输入载荷、传动参数和失配参数等), 输出端的神经元为有限元分析结果参数(受载下的传动误差、接触应力、弯曲应力和最大变形等)。用大量已知有限元分析结果来训练人工神经网络。在经过训练后人工神经网络的输入端给出设计参数值, 就可快速在输出端得到基于有限元分析结果的预测值。

关于人工神经网络的建立, 用人工神经网络软件包 Professional 来协助完成。该软件包有多种标准人工神经网络程序。以前开发机械传动人工神经网络的经验^[4]也应用到本研究来。

2.4 基因遗传法优化传动参数

基因遗传法优化法用来进行多目标多参数的优化。优化的参数包括模数、齿数、变位系数、压力角、蜗杆特性系数和中心距等; 优化的目标包括最低传动误差、接触应力、弯曲应力和变形等。优化参数即为人工染色体的各个基因。在优化的过程中, 要多次调用前面提到的两个人工神经网络, 以得到目标函数的值。对于蜗轮副分析而言, 这样的多目标多参数的优化, 用其他方法是难以达到的。应用的是以往开发的适于齿轮优化设计的基因遗传法^[5]。

基因遗传法优化程序用 Visual C++ 编制。因为基因遗传法优化程序要调用两个人工神经网络(见第 3.3 节), 所以, 该项工作要在人工神经网络完全建立好以后才能进行。

2.5 试验研究

试验验证齿面接触及载荷分配, 包括: 同时进入啮合的各对齿之间的载荷分配, 同一齿面上载荷的变化, 接触区变化, 齿的变形, 弯曲应力及接触应力。从而对计算机模拟, 数值分析, 优化结果给以验证。

试验研究包括三项内容: 蜗轮齿根的弯曲应力及同时进入啮合的各对齿之间的载荷分配, 光弹试验用以确定齿面接触应力, 测量传动效率和蜗杆蜗轮传动副的工作温度。

3 蜗轮副传动效率及工作温度的试验研究

作为该项目的第一步工作, 蜗轮副传动效率及工作温度的试验研究已取得初步结果, 现将部分结果报告如下。

用两套蜗轮副进行了对比试验。这两套蜗轮副

是依次装在同一齿轮箱内进行试验的。齿轮箱的中心距为 125 mm。蜗轮装在箱体上的情况如图 1、图 2 所示。试验台如图 3 所示, 测试方案原理如图 4 所示。直流电动机经过转矩转速传感器带动齿轮箱, 齿轮箱输出轴亦与另一转矩转速传感器相连。直流电动机的速度是由直流调速装置控制的, 转矩转速传感器与计算机相连以获取读数。温度传感器放置在润滑油中, 并与温度读数显示装置相连。

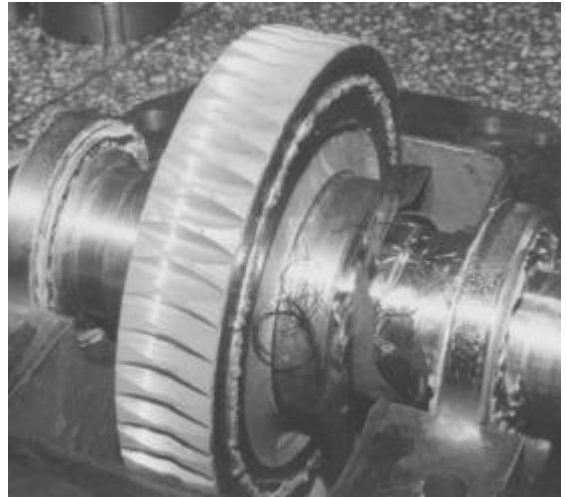


图 1 与单头蜗杆相配的蜗轮, 齿数 $z=50$

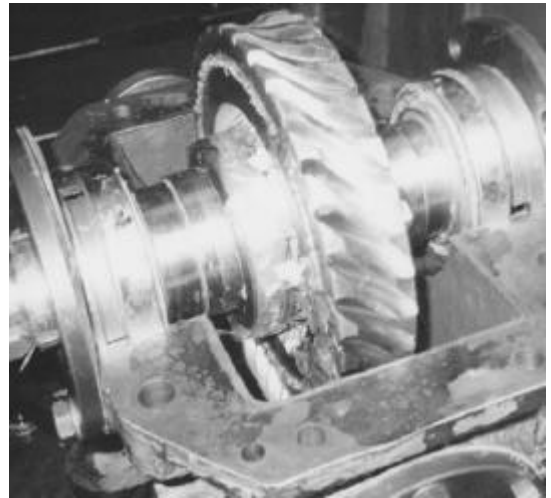


图 2 与 6 头蜗杆相配的蜗轮, 齿数 $z=31$

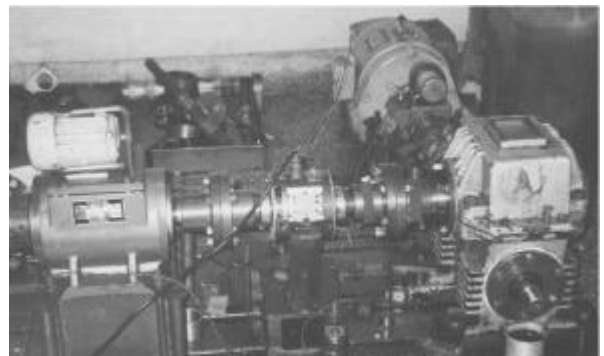


图 3 蜗杆传动试验台

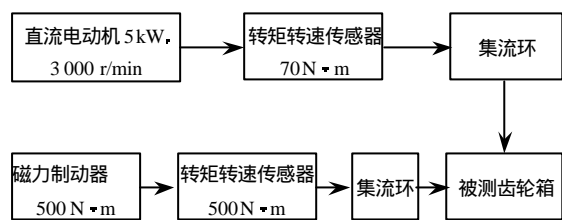


图4 蜗杆传动试验测试方案原理图

蜗轮副有关参数如下：蜗轮副 I 的模数为 6.7564 mm，蜗杆头数为 6，蜗杆特性系数为 6，蜗轮的齿数为 31；蜗轮副 II 的模数为 4.1656 mm，蜗杆头数为 1，蜗杆特性系数为 10，蜗轮的齿数为 50。两套蜗轮副的模数均为非标准值，这是为了使它们的中心距为同一值 125 mm。两蜗杆均为渐开线圆柱蜗杆。试验所用的润滑油相同。

根据接触斑点检测结果，蜗轮副 I 可明显地看出是失配蜗轮副，蜗轮齿面上的接触区基本在蜗杆旋入一侧；蜗轮副 II 的失配量基本上看不出来，80% 的齿面接触，因此，可以视为线接触，接触区位于齿面的中部。

试验结果表明，蜗轮 I 的齿体工作温度为 60℃ 左右，效率可达 69%；蜗轮 II 的齿体工作温度为 80℃ 左右，效率在 60% 左右。

从试验结果可以看出，蜗轮副 I 明显优于蜗轮副 II。这不仅仅是因为蜗轮副 I 的螺旋升角大于蜗轮副 II，还在于蜗轮副 I 是失配蜗轮副，润滑条件优于线接触蜗轮副 II。从传统的观点来看，线接触可以降低齿面单位载荷；但是，从另一方面来看，普通圆柱蜗杆(包括渐开线圆柱蜗杆)传动的接触线与齿面运动合速度的夹角极小，甚至为零，无法形成润滑油膜，有的区域甚至无法形成边界润滑，因此，过长的接触线会导致齿面摩擦加剧，增加齿面温度，恶化润滑条件，甚至导致齿面失效。对于失配蜗轮副，蜗杆和蜗轮在没有载荷的情况下是“点”接触，受载变形后，接触“点”变为接触“区”，齿面运动合速度与接触区的夹角远大于与接触线的夹角，从而利于润滑。由此分析可见，失配蜗轮副的润滑条件优于线接触蜗轮副。这与试验结果是一致的。当然，这只是定性的分析，还需要做大量的研究工作，才能给出更切合实际的结果。

4 结论

提出的研究将多项先进技术(弹性啮合原理，计算机仿真加工，计算机三维动态模拟，人工神经网络和基因遗传法)综合应用到蜗杆传动研究中来。由于多项先进技术的综合应用，提高了研究质量。

蜗轮蜗杆的接触区情况，通常是用真实蜗轮副检验的。显然，这是费工费时的。为解决这一问题，提出应用先进的 CAD/CAM 软件 Pro/Engineer，虚拟加工蜗轮蜗杆，进行接触区的三维动态模拟，并可模拟装配误差下的接触状态。这种方法直观、经济，大大提高了设计质量和速度。

由于蜗杆传动啮合原理的复杂性，许多参数之间的关系复杂，甚至无法用数学关系式表述，给设计参数的优化带来极大的困难，提出应用人工神经网络和基因遗传法，从而解决蜗杆传动设计参数的优化问题。

应用有限元法进行蜗轮副载荷变形下的齿接触分析，在现阶段仍然是探索的课题，研究具有实用性；特别是整体模型的有限元分析，避免了由于假设边界条件所带来的局限性，较之通常采用局部模型分析，大大进了一步。

作为该项目的第一步工作，蜗轮副传动效率及工作温度的试验研究已取得初步结果。试验结果表明，失配蜗轮副的润滑条件优于线接触蜗轮副，从而提高承载能力。

所述的蜗轮副效率和工作温度试验是机械传动国家重点实验室国际合作的一部分，英国 Nottingham Trent 大学的研究人员参与了工作，英国有关的公司给与了技术支持，在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Litvin F L, Chen J S, Liu J et al. Application of finite element analysis for determination of load share, real contact ratio, precision of motion and stress analysis. ASME Journal of Mechanical Design, 1996, 118 : 561~567
- 2 Qin D T, Qin D X. Tooth contact analysis of hourglass worm gearing on the condition that errors mixed with deformation. In : proceedings, the International Conference on Gearing, Transmission and Mechanical Systems, 2000 , Nottingham : 109~118
- 3 Su D, Yang F, Gentle C R. Finite element analysis for ZI worm gears with localised tooth contact. In : Proceedings, ASME Design Engineering Technical Conferences-8th International Power Transmission and Gearing Conference, 10-13 September, 2000, Baltimore, Maryland, Paper No DETC 2000/PTG-14402
- 4 Su D, Wakelam M, Jambunathan K. Integration of a knowledge-based system, artificial neural networks and multimedia for gear design. Journal of Material Processing Technology, 2000, 107(1~3) : 53~59
- 5 Su D, Wakelam M. Evolutionary optimisation within an

intelligent hybrid system for design integration. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing Journal, 1999, 5 (11) : 351~363

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO MISMATCHED CYLINDRICAL INVOLUTE WORM GEAR DRIVES USING ELASTIC MESHING THEORY, MANUFACTURE SIMULATION AND RELATED ADVANCED TECHNIQUES

*Su Daizhong Chen Bingkui
Qin Datong Chen Xiaoan
Peng Zheliang Wang Jian
(Chongqing University)*

Abstract : A theoretical and experimental approach is proposed for investigation into mismatched worm gear drives. The major objectives of the project include : ① computer aided simulation of the performance and behaviors of worm gears under real working conditions including manufacturing errors and elastic deformation due to external load; ② based on the simulation

results, to develop an advanced approach for tooth strength evaluation, tooth mesh analysis, prediction of transmission errors, and optimization of design parameters; and ③ experimental investigation to verify the theoretical analysis results and CAD simulation. In order to achieve the objectives, several advanced techniques are applied, including elastic gearing theory, virtual manufacture, 3-D CAD simulation, artificial neural networks, genetic algorithms, and advanced experimental methods. The research is mainly focused on mismatched involute cylindrical worm gears, but the principles developed are also applicable for other types of worm gears.

Key words : Worm gearing Elastic Meshing theory of gears Manufacturing simulation Artificial intelligence

作者简介: 苏代忠, 重庆大学机械传动国家重点实验室“长江学者奖励计划”特聘教授, 英国诺丁汉特伦特大学教授。主要研究方向包括机械传动理论与设计, 齿轮啮合原理, 蜗杆传动, CAD/CAM/CAE, 人工智能, 基于网络的协同设计与制造, 工程多媒体, 工程设计与产品设计。主要国际兼职包括联合国信息科学院院士, 国际机器与机构理论联合会齿轮委员会委员, 国际标准化学会英国齿轮委员会委员, 英国齿轮协会技术委员会委员, 匈牙利密斯科尔茨大学兼职教授, 英国格拉斯哥卡拉多尼亚大学特聘教学评审, 国际学术期刊《齿轮与传动》编委, 专刊编辑等。参与组织 20 多个国际学术会议, 任会议主席, 副主席, 委员会主席, 副主席和委员等。