



齿轮设计
丛书

CHILUN SHEJI
CONGSHU

齿轮的试验技术与设备

朱孝录 易秉铖 廉以智 编著 机械工业出版社
关 焯 杨 明 车晓东

本书为齿轮设计丛书之一，主要介绍齿轮传动承载性能试验方面的技术问题。内容包括齿轮试验设备和齿轮试件的设计、选择；齿轮承载性能试验和测试技术；轮齿失效的观察与分析；齿轮试验的统计设计与分析；最后还介绍了齿轮振动与噪声的测试技术等。

本书可供从事齿轮研究、设计、制造的工程技术人员使用，也可供有关大专院校师生参考。

齿轮的试验技术与设备

朱孝录 易秉钺 廉以智 编著
关 焯 杨 明 车晓东

责任校对：贾立萍 版式设计：张世琴
责任印制：卢子祥

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $14^{3/4}$ · 字数 323 千字
1988年12月北京第一版 · 1988年12月北京第一次印刷
印数 0,001—3,000 · 定价 6.10元

ISBN 7-111-00628-3/TH·98

出版说明

齿轮是应用非常广泛的重要传动元件。随着科学技术的飞跃发展，对齿轮传动提出了越来越高的要求。为了适应形势的需要，总结、介绍国内外先进经验与技术，特决定组织出版这套《齿轮设计丛书》，以利提高我国齿轮设计、生产水平。

本丛书内容包括：齿轮啮合原理、齿轮传动的精度、各类齿轮传动（包括特种齿轮）和各类蜗杆传动的设计、齿轮的试验技术与设备等等。内容着重于介绍设计的理论基础、设计方法、设计参数以及数据的分析选择等，力图满足齿轮传动设计者的需要。因此，本丛书主要供从事齿轮设计、制造工作的工程技术人员参考。丛书将分若干分册陆续出版。

由于水平有限，书中难免有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

前 言

由于高性能、高强度、高可靠性以及相对低成本的要求，近十几年来，在齿轮传动的理论分析方面，除了应用数学、力学、材料及设计理论的新成就外，另一个突出的进步就是试验技术受到重视和进一步发展。特别是在测试技术方面的声学、光学、电子学等现代技术的应用，使过去一些难以定量研究的问题，如齿面的弹性流体动力润滑参数（齿面瞬时温度、油膜厚度等）、轮齿的微量弹塑性变形、齿面失效状况的监测等都找到了接近于实用的测试手段。因此，也就使理论工作直至齿轮产品的质量有了更大的提高和发展。齿轮传动的大量问题是综合性的，不少问题难于进行理论分析和纯数学定量，而必须用试验的方法解决。例如综合了已有的大量研究成果的国际标准化组织（ISO）齿轮承载能力计算方法（与GB3480-83等效）中的许多系数和各种材料的轮齿疲劳极限应力，都是在大量试验的基础上，确定其取值范围或计算公式的。可以这样说，齿轮传动技术的进一步发展和存在问题的解决，在很大程度上依赖于先进试验技术的应用。

由于上述原因，在国外，齿轮的试验研究较早地受到了重视和得到了发展。早在1931年，美国机械工程师学会（ASME）齿轮强度专门委员会就对不同齿轮材料的表面疲劳特性进行了大量的试验研究。从1946年起还进行了长达15年之久的轮齿弯曲疲劳试验研究，作了大约3000多个齿轮轮齿的试验。试验结果为美国齿轮制造业协会（AGMA）所采

用。以后,美国国家宇航局(NASA)的Lewis研究中心成为重要的齿轮试验研究机构。这个机构研究的内容比较广泛,但主要研究领域是有关齿轮热特性和热动力学,因此在齿轮的冷却特性、温度场、齿面温度、热变形等方面的理论研究和试验研究都取得许多重要的进展。国际上最著名的齿轮研究机构是由G.Niemann教授于1951年创建的西德慕尼黑大学的齿轮研究室(FZG)。这个研究室从建立时起就非常重视试验研究,它设计了著名的FZG齿轮试验机,编制了FZG齿轮试验规程。由这个研究室提供的大量试验数据,已成为ISO齿轮承载能力计算标准的基础。此外,苏联以中央机械制造与工艺研究院(ЦНИИТМАШ)的齿轮试验室为中心,同时在一些大学(如奥德萨工学院等)和工厂进行了大量的齿轮试验研究工作,这些研究成果在ГОСТ21354-75《渐开线圆柱齿轮传动的强度计算》中得到充分的反映。

我国真正全面开展齿轮试验研究工作起步较晚,1979年,北京钢铁学院、郑州机械研究所和北京市机电研究院等单位组成齿轮研究小组,用三年时间,运转试验了近200多对齿轮,对我国球铁齿轮的承载能力进行了全面的试验研究,这是至今已知的一次较大规模的齿轮试验研究。此后,齿轮的试验研究有较大进展,如各种软硬齿面钢齿轮极限应力的测定,轮齿的变形和刚度、油膜厚度和齿面瞬时温度的测定都取得初步的成果。一些现代的测试方法,如激光散斑法测定轮齿变形、原子吸收光谱法测定轮齿磨损量,开始在齿轮试验中得到应用。在齿轮试验装置的设计和研制方面也加快了步伐,目前已有多种齿轮试验机,如CL-100, JG-150等经鉴定后投入批量生产。齿轮试验机和试验规程的规范化和标准化已经提到日程上来了。

齿轮试验涉及的内容是广泛的,从广义上来讲,一切测定齿轮几何尺寸和性能参数(如制造误差、运动和动力参数、承载能力和寿命、失效的观察与分析等)的技术都可归入齿轮试验的范围内;但是,通常由于齿轮的制造误差和运动精度的测量已成为一个专门的领域,因此本书所涉及的齿轮试验技术以齿轮强度试验为主,具体包括以下内容:

- 试验的设计与规划,例如确定试验环境(台架或现场、工作介质状况等),选择试验的因素,决定直接或间接的测量对象和工作条件、主要参数的模拟和控制,合理确定试验程序和试验过程的实施细则,进行试验的统计设计等。

- 齿轮试验机的选择、设计和性能测定。

- 测试技术,例如齿轮整体或局部的运动学、动力学测试,试验中信号的变换、传输、测量和记录,齿轮寿命、强度和振动噪声的测试等。

- 齿轮损伤与失效的观察、分析和判断。

- 试验数据的收集与整理。

为了使中级工程技术人员对齿轮试验技术有一个全面的了解,本书力求有一个完整的体系,并能在一定程度上反映近年来的研究成果。但为了避免篇幅过大、内容过深,许多专门问题只能作知识性的介绍。如果读者是为研究目的而阅读本书时,可参考有关的参考文献。本书中的许多内容(如齿轮试验机负荷特性的测定,轮齿弯曲静强度试验方法,轮齿失效复膜技术等)是编者多年来进行齿轮试验研究的经验总结。这些经验绝大多数都在公开出版物刊登过,并经过实践的考验证明行之有效。

本书由朱孝录主编,全书共分十一章,其中第一、二章由易秉铨编写,第四、五章由廉以智编写,第六章和第三章

八、九节由杨明编写，第七、九章由关焯编写，第十一章由车晓东编写，其余各章（三、八、十章）和第五章一、二节由朱孝录编写。

清华大学蒋孝煜教授详细地审阅全书，并提出了许多宝贵的修改意见，谨此致谢。

编著者

目 录

前言

第一章 齿轮试验设备	1
一、几种典型的齿轮试验设备	2
二、加载装置	17
三、试验设备的设计	25
四、试验设备的载荷特性测定和精度指标	36
第二章 齿轮试件	47
一、对齿轮试件的基本要求	47
二、齿轮试件的设计	50
三、齿轮试件的检验	58
第三章 齿轮承载性能试验	65
一、概述	65
二、脉动加载的轮齿弯曲疲劳试验	66
三、运转式齿轮弯曲疲劳试验	70
四、运转式齿轮接触疲劳试验	72
五、齿轮胶合与油品承载能力试验	76
六、齿轮的磨损试验	82
七、齿轮动载荷的测试	85
八、轮齿齿向载荷分布的测试	93
九、轮齿齿间载荷分配的测试	99
十、齿轮传动效率和啮合损失的测试	103
十一、齿轮本体温度和齿面温度的测试	116
十二、齿轮油膜厚度的测试	125
第四章 轮齿失效的观察与分析	133
一、轮齿的损伤形式和辨别	133

二、轮齿损伤的观察与检查	153
第五章 轮齿变形、静强度和冲击强度的试验	167
一、轮齿变形和刚度的测试	167
二、轮齿弯曲静强度的测试	176
三、轮齿抗冲击能力的测试	186
四、轮齿的小能量多冲抗力的测试	187
第六章 齿轮的断裂力学试验	193
一、断裂力学及其在齿轮强度分析中的应用	193
二、应力强度因子的测试	197
三、平面应变断裂韧性的测试	205
四、表面裂纹断裂韧性的测试	212
五、裂纹扩展速率的测试	218
第七章 齿轮试验技术中的统计学基础	224
一、试验数据的整理	224
二、常用分布函数及其检验	237
三、测量的误差分析	263
第八章 齿轮疲劳强度的几种常用试验方法	269
一、少试件的 $S-N$ 曲线试验	269
二、成组试件的 $S-N$ 曲线试验	282
三、升降法测定齿轮疲劳极限值	289
四、齿轮疲劳极限应力快速测定法	294
第九章 齿轮 $R-S-N$ 曲线的测试	303
一、概述	303
二、可靠性基本概念及其主要指标	306
三、 $R-S-N$ 曲线的试验和绘制	319
四、齿轮的可靠度和寿命预测	340
第十章 齿轮性能的对比试验	345
一、对比试验方案的选择	345
二、平均值和标准差检验	349

三、正态分布下的对比	350
四、Weibull 分布下的对比	363
五、未知分布下的对比——非参数试验	373
第十一章 齿轮振动与噪声测试	376
一、齿轮的振动与噪声	376
二、齿轮振动测试	381
三、齿轮噪声测试	406
四、齿轮振动与噪声测试实例	430
附录	436
附录表 1 正态分布概率积分表	436
附录表 2 t 分布双侧分位数(t_{α})表	438
附录表 3 χ^2 分布表	439
附录表 4 $\sigma/\mu-k$ 表	440
附录表 5 中位秩表	441
附录表 6 5 %秩表	443
附录表 7 95%秩表	445
附录表 8 F 分布数值表 ($\alpha = 10\%$)	447
附录表 9 F 分布数值表 ($\alpha = 5\%$)	448
附录表 10 F 分布数值表 ($\alpha = 1\%$)	449
附录表 11 秩和检验表($\alpha = 10\%$)	450
附录表 12 秩和检验表($\alpha = 5\%$)	451
附录表 13 秩和检验表($\alpha = 1\%$)	452
参考文献	453

第一章 齿轮试验设备

齿轮试验,除了常规的轮齿静强度、轮齿弯曲疲劳强度、齿面接触疲劳强度、齿面磨损、齿面胶合试验外,还包括齿轮的一些影响参数和其他性能的测试,如齿轮效率、齿轮的润滑、齿轮的动载荷和噪声、轮齿的载荷分布、齿面及本体温度的测试等等。这些试验,一般都在专门设计的齿轮试验设备上进行。由于试验目的和要求的不同,采用试验方法的不同,相应采用了许多不同的齿轮试验设备。它们的加载方法、运转方式和结构式样往往有很大的差别。有关这些试验方法和设备,可以查阅许多文献[3][5][80][88]。

评定齿轮承载能力的基本性能指标主要是齿轮的静强度、轮齿的弯曲疲劳强度、齿面接触疲劳强度、齿面的抗磨损和抗胶合能力。

有人采用圆盘对滚试验机进行轮齿表面接触疲劳强度或齿面磨损、胶合的模拟试验研究;也有人采用轮齿模板或齿轮试件进行非运转式的轮齿静强度或轮齿弯曲疲劳强度试验研究。这些方法,除齿轮静强度外,很显然均与齿轮运转时的工作状态、应力状态有相当大的差别,不太可能获得满意的试验结果。所以,目前国内外的生产和研究单位,广泛采用运转式的齿轮试验设备进行齿轮的各种承载能力的试验研究,它们可以获得比较满意的试验结果。

齿轮试验设备通常可分为非运转式和运转式两大类。

非运转式齿轮试验设备,是指齿轮或齿轮副只能在静止状态下进行试验的设备,如静态加载的轮齿静强度试验设

备、脉动加载的轮齿弯曲疲劳试验设备等。

运转式齿轮试验设备，是指齿轮副能在一定的转速下进行试验的设备。这类设备一般都由驱动装置、传动装置、加载装置、齿轮试件失效监护装置、润滑装置、测试装置六部分组成。其中加载装置是齿轮试验机的重要部件，它的种类繁多，特性各异，在本章中将设专节介绍一些典型的加载装置。

目前，齿轮试验机的结构型式、性能等还没有统一的规范或标准，因此对齿轮试验机精度的评定，还是一个值得探讨的问题。本章第四节中介绍的评定齿轮试验机载荷特性和精度指标的方法还是初步的，仅供参考。

一、几种典型的齿轮试验设备

1. 脉动加载的轮齿弯曲疲劳试验设备

这种试验中，试验齿轮处于静止状态，而压在轮齿上的压头作脉动循环加载，因而使轮齿产生弯曲疲劳折断。

这种试验设备，虽然不能反映齿轮啮合过程的某些动态特性，但却能很好适用于单参数的快速对比性能试验，用以判断不同载荷、材料、齿形和其他一些因素对轮齿弯曲疲劳强度的影响。特别是对一些软齿面的齿轮，由于接触疲劳强度低于弯曲疲劳强度，采用运转式齿轮试验设备进行弯曲疲劳强度试验往往是困难的，因此，这时采用脉动加载的轮齿弯曲疲劳试验设备就更为普遍。

这种试验设备，最简单的是定型的 PLG-10 高频疲劳试验机或 PWS-10 型电液伺服程序控制疲劳试验机，并采用图 5-12 的夹持装置。

为了使轮齿上载荷更接近轮齿实际啮合时的状况，常采用专门设计的试验设备。

图 1-1 所示为用在锥齿轮试验上的液压激振轮齿弯曲疲

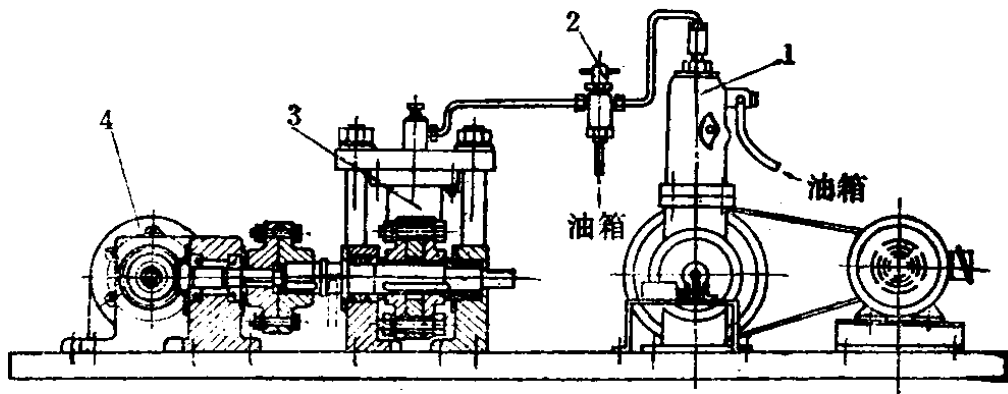


图1-1 液压激振轮齿弯曲疲劳试验机^[81]

1—液压激振装置 2—液压调节装置 3—工作油缸 4—试件夹持装置

劳试验机，它由加载装置和试件夹持装置两大部分组成。加载装置又由液压激振装置、液压调节装置和工作油缸等组成。其试件的夹持装置的结构（俯视图）如图 1-2 所示。

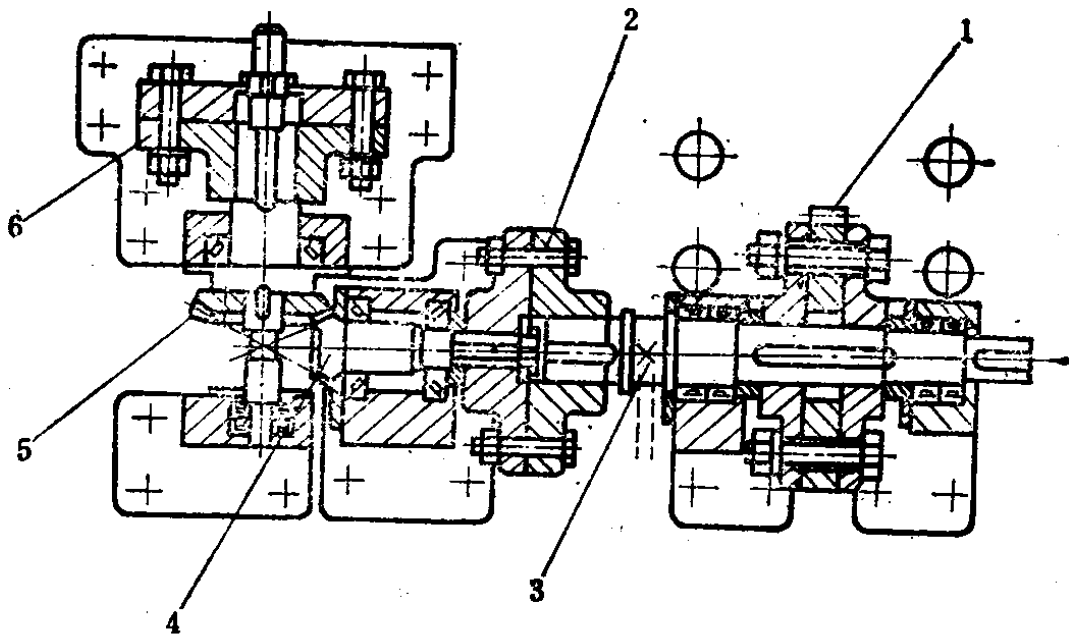


图1-2 液压激振轮齿弯曲疲劳试验机的试件夹持装置

1—扇形齿轮 2—联轴器 3—电阻片 4—试验齿轮 5—固定陪试齿轮 6—固定法兰盘

类似这种试验机加载装置的工作原理如图 1-3 所示。在试验机正式工作之前，由液压调节系统 1 打出压力油，通过

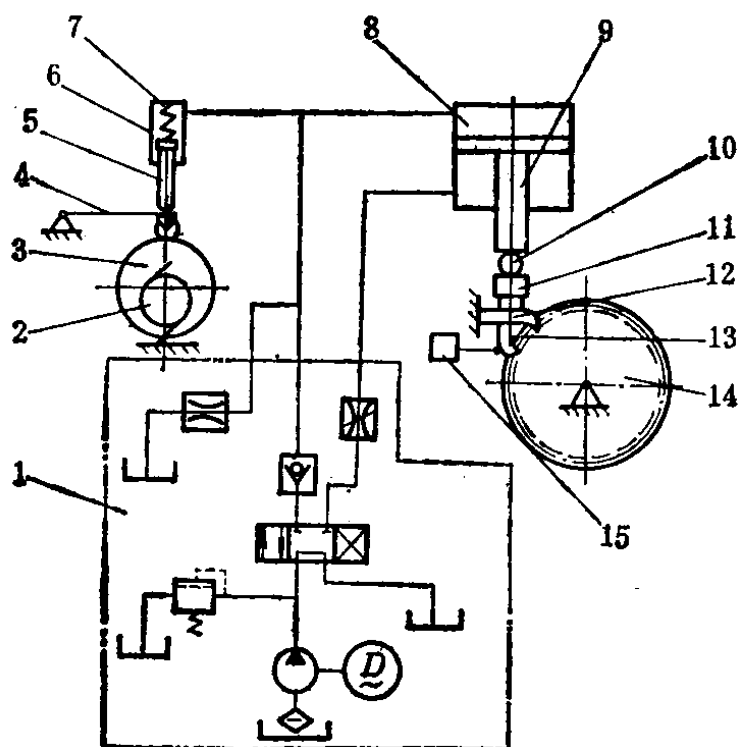


图1-3 液压激振轮齿弯曲疲劳试验机

加载装置工作原理图[⊖]

- 1—液压调节系统 2—电动机 3—凸轮 4—调节杆 5—激振柱塞
6—激振柱塞缸 7—弹簧 8—工作油缸 9—工作油缸的活塞杆
10—钢球 11—力传感器 12—顶块 13—压头 14—试验齿轮 15—
断齿自动停车开关

工作油缸 8、压头 13 给齿轮施加预定的静压力。当电动机 2 通过减速装置带动凸轮 3 转动，激振柱塞缸的柱塞杆 5 在凸轮 3 和弹簧 7 的作用下，作上下的往复运动。在柱塞向上运动时，工作油缸 8 内的油压增高；在柱塞向下运动时，工作油缸内的油压降低。因此，通过压头给试验齿轮 14 施加的载荷

⊖ 阎志彪，液压激振齿轮弯曲疲劳试验台，兰齿技术，1984，No.1

作周期性脉动变化。

试验机所预加的静压力的大小可由液压调节装置调节；其脉冲力的大小，可通过调节杆4调节激振柱塞杆的行程来实现。为了准确测定试验齿轮承受的预加静压力和激振力的大小，可通过力传感器11，在二次仪表上直接显示出。

上述的液压激振装置，实际上是一单柱塞油泵。首先按试验要求确定最大试验冲击力（即工作油缸的最大试验油压），便可设计其他参数。

采用液压激振方法的这种试验机的优点是：易于控制，可用较小的输入功率得到较大的激振力，液压系统可选用标准液压件。缺点是结构比较复杂，工作时的冲击、振动较大。

2. 功率流开放式齿轮运转试验设备

这类试验设备和一般机器相似，它也是由三部分组成，只是把一般机器的工作机部分由一个耗能负载装置所代替。因此，这类试验设备通常由原动机、受试齿轮装置和耗能负载装置三部分组成。很显然，其功率流只是由原动机流向耗能负载装置，是开放型的。

这类试验设备的主要优点是结构简单，制造、安装方便；配置灵活，容易实现不同中心距或中心高的齿轮试件或齿轮箱产品的试验；能在无载下起动并能在运转过程中任意改变载荷。但是，由于采用耗能装置作为加载装置，能量消耗大，原动机的容量相应要求较大。它们主要应用于中小载荷、非长期运转的齿轮试验中，如齿轮的效率、噪声、动载荷等性能试验。模拟实际载荷谱的程序疲劳试验，常采用功率流开放式齿轮试验设备。

这类试验设备的关键部件是耗能负载装置，它很大程度

上影响试验设备的性能和应用。目前采用的耗能负载装置有机械制动器（闸块或闸带）式、磁粉制动器式、电磁涡流消功器式、水力涡流消功器式和电机消功器式等。下面仅介绍两种典型的试验机。

1) 电磁涡流消功器式齿轮运转试验机

图 1-4 所示是一种电磁涡流消功器式齿轮运转试验

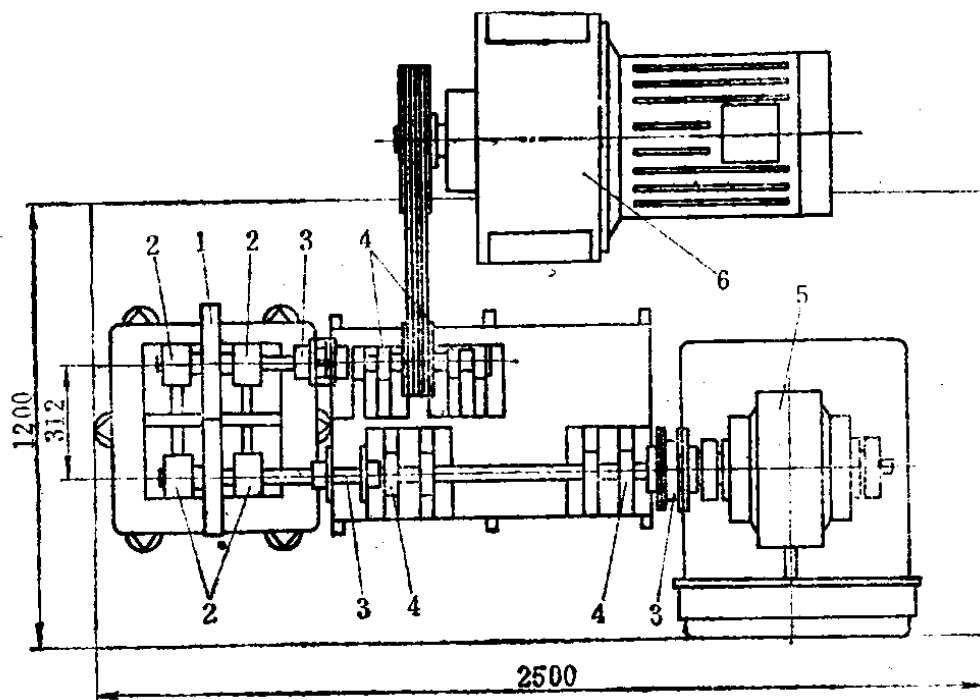


图1-4 电磁涡流消功器式齿轮运转试验机

1—试验齿轮 2—球轴承 3—联轴器 4—球轴承 5—电磁涡流消功器 6—可变速直流电动机

机〔82〕。功率为55kW的可变速直流电动机6通过带传动驱动试验齿轮1。试验齿轮副的输出轴通过联轴器3与电磁涡流消功器5联接，以实现试验齿轮的加载。该试验机对齿轮作用最大扭矩为212N·m，最高转速为3420r/min，试验齿轮中心距范围为100~320mm。

电磁涡流消功器作为耗能负载装置的工作原理和发电机

相似，其转子通过直流电后形成磁场，转子和定子之间随之形成封闭的磁力线。当通过试验齿轮轴、联轴器使转子转动时，磁场发生变化，定子的金属中产生涡流，阻碍转子轴运动产生阻力矩，这就对齿轮试件进行了加载。通过可变电阻器改变输入转子线圈的电流大小，即可改变试验齿轮上加载的大小。

这种试验机与其他试验机相比，结构简单，布置灵活性较大，在运转中能平稳地改变试验载荷，易实现程序控制，但它需专用的供电机组，占地面积较大，费用较高，并且由于涡流发热，在功率大时，电磁铁太大，不适用于较大载荷的齿轮试验。

2) 水力涡流消功器式齿轮运转试验机

图 1-5 所示是一种水力涡流消功器式齿轮运转试验机〔4〕，用来进行齿轮变速箱产品试验。它主要由直流电动机 2、试验齿轮变速箱 4、增速箱 8 和水力涡流消功器 10 组成。直流电动机功率为 240kW，最高转速为 3600r/min，可无级调速。电动机输出端配有速比为 1.63 的减速箱，输出的最大扭矩为 1040N·m，最高转速不超过 2200r/min。

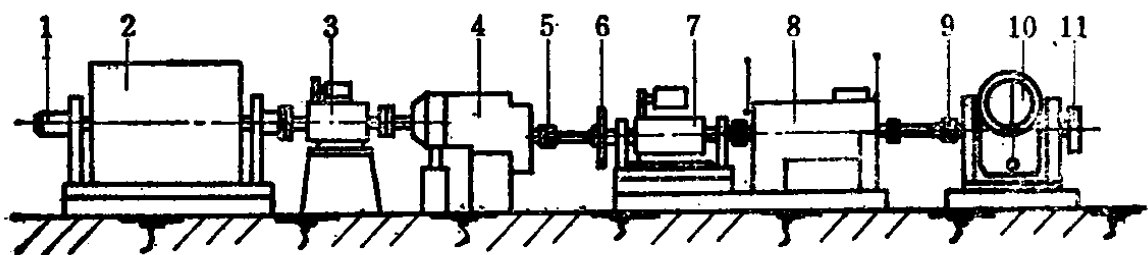


图1-5 水力涡流消功器式齿轮运转试验机

1—测速发电机 2—直流电动机 3—输入扭矩转速传感器 4—试验
齿轮变速箱 5、9—万向联轴器 6—测速盘 7—输出扭矩转速传
感器 8—增速箱 10—水力涡流消功器 11—制动轮