

iHF齿轮学院

齿轮测量与结果解读

石照耀 博士

深 圳

2019.1.12

石照耀 博士



- 长江学者特聘教授，国务院特殊津贴专家，“十二五”全国机械工业科技创新领军人才
- ISO /TC60（国际齿轮标准委员会）中国委员
- CGMA齿轮协会副会长兼常务副秘书长
- 全国齿轮标准化技术委员会副主任委员

齿轮传承人类文明

历史
悠久



中国西汉



古罗马



2017年齿轮产值



9000亿



2360亿

第一位

零部件中最大的产业

在现代工业
起关键作用

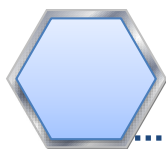


传递运动和动力

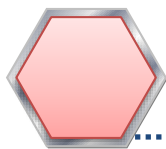
见证人类技术进步

工业化标志

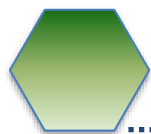
提纲



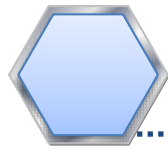
一、齿轮精度



二、齿轮测量



三、结果解读



一、齿轮精度

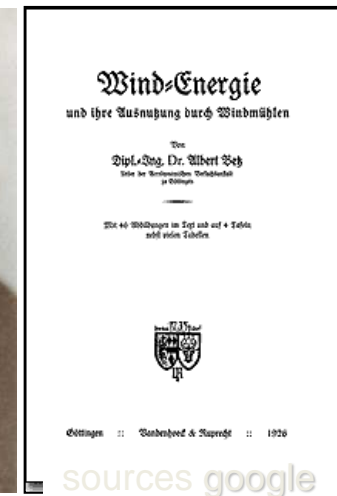
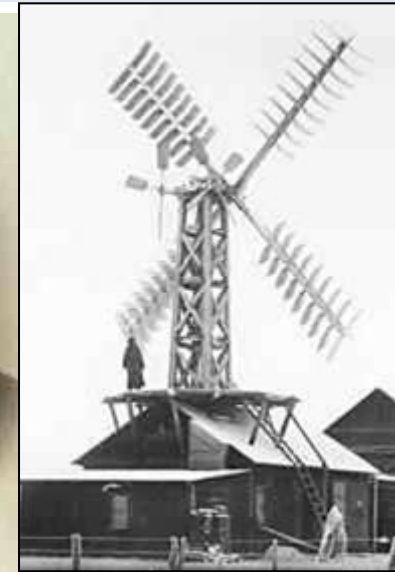
1、齿轮技术演变——三要素

- 齿轮三要素：**齿廓曲线、材料、加工方法**

- **齿廓形状**：直线；
渐开线占主导地位；
复杂曲线；

- **齿轮材料**：原始的木料；
钢材占主导地位；
各类高性能材料

- **加工方法**：手工制作；
铸造；
金属切削加工占主导地位的
高效加工



- **每一个要素的变化都体现了齿轮技术的进步和发展，使得齿轮的性能大大增强**

2、齿轮精度三理论

- 1) 几何学理论：模型化测量、静止的
- 2) 运动学理论：刚性传动元件、运动的
- 3) 动力学理论：弹性传动元件、变形的

3、国际齿轮精度标准演变

在20世纪，诸多国家都有各自齿轮精度标准
国际上齿轮标准非常混乱！

1995年前：

UK	BS 436-1:1967 Basic rack form, pitches and accuracy (DP) BS 436-2:1970 Basic rack form, pitches and accuracy(metric) BS 978-1 :1968 Specification of fine pitch gears (DP) BS 4582-1: 1970 Specification of fine pitch gears (metric) BS 3696-1 :1977 Specification of master gears.
Germany	DIN 3962:1978 Accuracy of cylindrical gears, basis for DIN 3961:1978 Accuracy of cylindrical gears, tolerances.
USA	ANSI / AGMA 2000 A88 .
Japan	JIS / JGMA .
ISO	ISO 1328 :1975 Accuracy of cylindrical gears.

3、国际齿轮精度标准演变

1995年是转折点!

ISO/TC60/WG2工作组

1995年——ISO1328-1

ISO1328-1 : 1995 Cylindrical Gears - ISO system of accuracy-

Part 1 : Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.

ISO齿轮精度标准让世界齿轮行业显示了和谐化的可能性

4、 ISO齿轮精度标准体系

圆柱齿轮： ISO 1328 两个部分

- ISO 1328-1 : 1995 Cylindrical gears -ISO system of accuracy -
Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth
圆柱齿轮 ISO精度制
第1部分：轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值
- ISO 1328-2 : 1997 Cylindrical gears - ISO system of accuracy-
Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information
圆柱齿轮 ISO精度制
第2部分：径向综合偏差与径向跳动的定义和允许值

ISO1328 四个技术支持文件

检测规范

ISO 1328 is Supported by Technical Reports :

ISO / TR 10064

- **Part 1:** Inspection of corresponding Flanks on Gear teeth
轮齿同侧齿面的检验 **1992/2018**
- **Part 2:** Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash
径向综合偏差、径向跳动、齿厚和侧隙的检验 **1996**
- **Part 3:** Recommendations relative to gear blanks, shaft centre distance and parallelism of axes
齿轮坯、轴中心距和轴线平行度的推荐 **1996**
- **Part 4** Recommendations relative to surface texture and tooth contact pattern checking.
表面结构和轮齿接触斑点检验的推荐 **1998**

测量不确定度

- **ISO 18653:2003** Gears -- Evaluation of instruments for the measurement of individual gears
齿轮仪器不确定度评估
- **ISO/TR 10064-5:2005** Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments
检测规范：测量不确定度计算

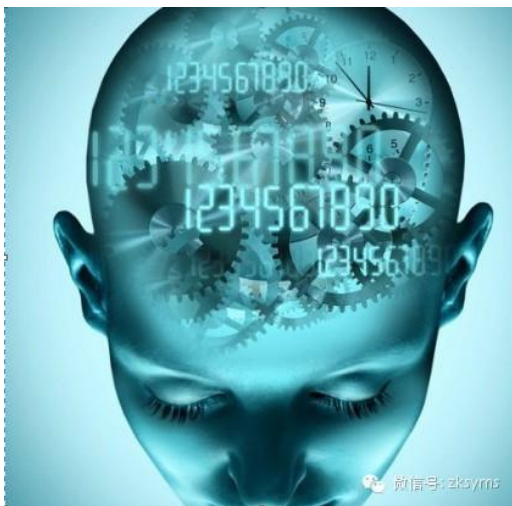
锥齿轮精度标准

1) ISO 17485:2006 Bevel gears -- ISO system of accuracy

基于ANSI/AGMA 2009-B01锥齿轮精度标准

2) ISO/TR 10064-6:2009 Code of inspection practice. Bevel gear measurement methods

锥齿轮测量方法



ISO/TC60搬美国后，1988年启动制订ISO/TR10064-1并于1992年发布，到2009年发布ISO/TR1006-6，历时20年，完成了齿轮精度标准体系工作。

4、新版齿轮精度标准：ISO1328-1：2013



国际标准

ISO 1328-1

第二版

2013年9月1日

圆柱齿轮—齿面公差分级制

第1部分：齿面偏差的定义和允许值

索引号：ISO 1328-1:2013(E)

几个问题：

- 目前 TC60正在修订的齿轮标准还有哪些？
 - 1) ISO1328-2
 - 2) 齿轮强度标准
 - 3) 蜗杆传动标准
- ISO1328-1：2013为其他国家采用情况？

迄今有：英国、法国、比利时、东欧、美国、日本。

5、我国齿轮标准的演变

- JB179-60 《圆柱齿轮传动公差》
1960年由一机部颁布实施
- JB179-81 《渐开线圆柱齿轮精度制》
由一机部颁布，1981年1月1日实施
- JB179-83 《渐开线圆柱齿轮精度》
由一机部颁布，1983年7月1日实施
- **GB/T 10095-88** 《渐开线圆柱齿轮精度》
由国家技术监督局发布，1989年10月1日实施
- GB/T 10095 《渐开线圆柱齿轮 精度》
由国家质量监督检验检疫总局发布
2002年6月1日实施，2008年9月1日修正版〔现行标准〕

6、齿轮误差项目确定

弄清齿轮误差的“来龙”和“去脉”

来龙——工艺误差分析，为此定义一些误差项目

去脉——齿轮性能预报，为此定义一些误差项目

为方便检测：代用项目

有些项目有多种用途

7、齿轮误差基本项目

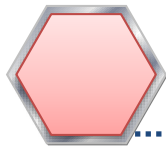
- **单项**误差：齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差
- **综合性**误差：切向综合偏差、径向综合偏差
- **关键**：误差项目间的关系

各国齿轮标准的各项公差精度等级对应关系

类	符号	标 准	精 度 等 级							
单 项 公 差	F_r	ISO、GB/T	3	4	5	6	7	8	9	10
		DIN	4	5	6, 7	8	9	10	10	11
		JIS	—	0	1	2	3	4	5	6
		AGMA	15	14	13	12, 11	10	9	9	8
	f_{pt}	ISO、GB/T	3	4	5	6	7	8	9	10
		DIN	3	4	5, 6	7	8	9	10	—
		JIS	—	0	1	2	3	4	5	6
		AGMA	15, 14	13	12	11	10	9	8	7
	F_α	ISO、GB/T	3	4	5	6	7	8	9	10
		DIN	3	4	5	5	6	7	8	9, 10
		JIS	—	0	1	2	3	3	4	—
		AGMA	15	14	13	12	11	10	9, 8	7, 6
	F_i''	ISO、GB/T	3	4	5	6	7	8	9	10
		DIN	—	5, 6	7	8	9	10	—	11
		JIS	—	14, 13	12	11	10	9	8	8
	f_i''	ISO、GB/T	3	4	5	6	7	8	9	10
DIN		—	5	6	7	8	9	9	10	
JIS		—	13	12	11	10	9	8	7	

注：ISO—国际标准；GB/T—国标；DIN—德国标准；JIS—日本标准；AGMA—美国标准

提纲



二、齿轮测量

1、齿轮测量

齿轮测量分类

分析式测量
(单项测量)

齿廓测量

齿向测量

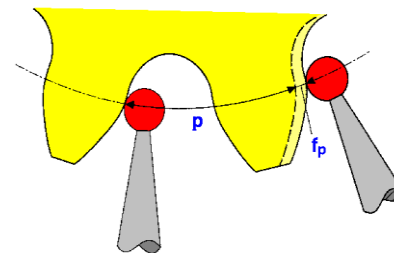
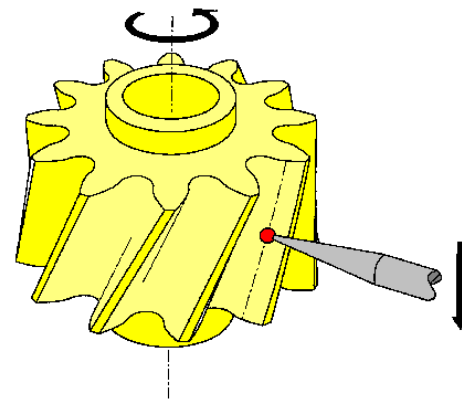
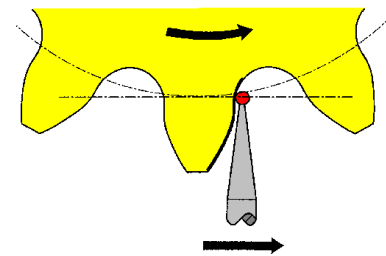
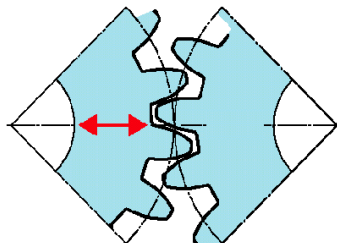
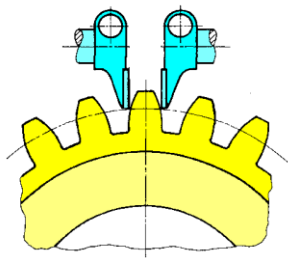
齿距测量

功能式测量
(综合测量)

单啮测量

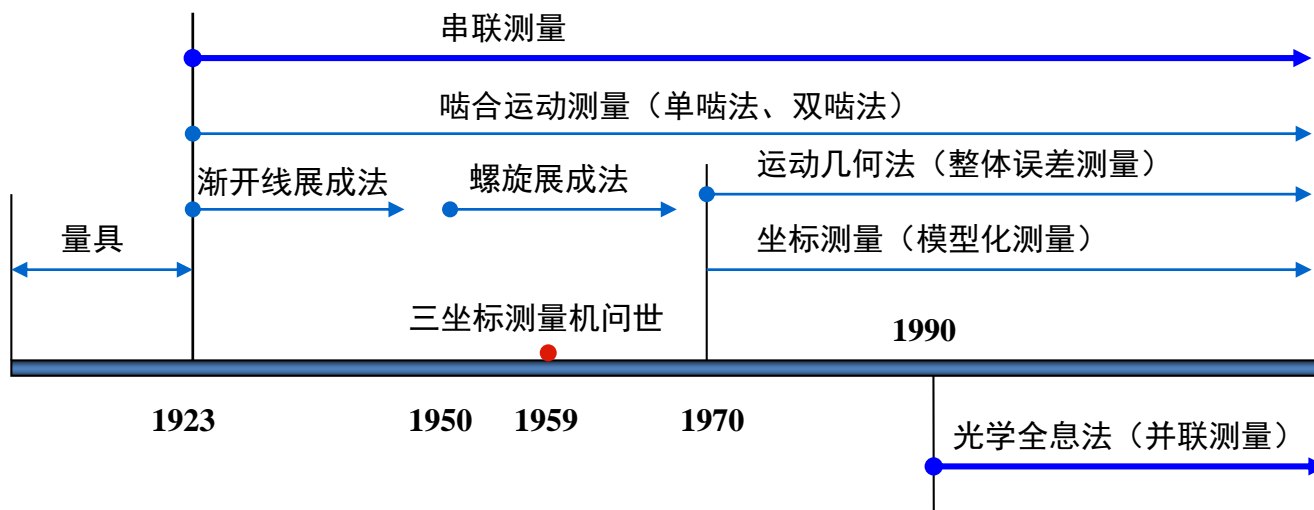
双啮测量

齿轮整体误差测量



2、齿轮测量方法的演变

齿轮测量方法的发展



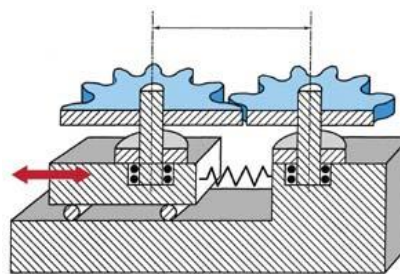
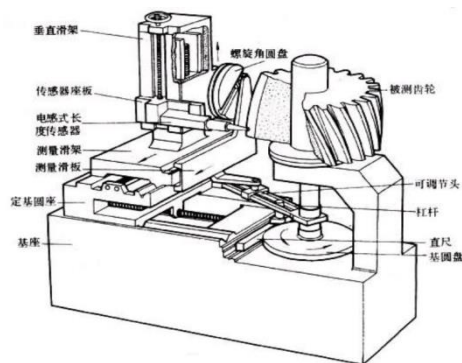
1970年是齿轮测量技术的转折点。齿轮测量中心和齿轮整体误差测量技术的出现解决了齿轮测量领域的难题，即在一台仪器上快速获取齿轮的全部误差信息。这两项技术虽然都基于现代光、机、电、计算机等技术，但走上了不同的技术路线。

2、齿轮测量方法的演变：典型事件



3、齿轮测量技术的演变

齿轮测量技术



测量原理

比较测量

啮合运动测量

模型化测量

技术手段

机械为主

机电结合

光机电信集成

结果表述

指示表+目视读取

仪器记录+人工研判

计算机自动处理

4、齿轮测量仪器的演变

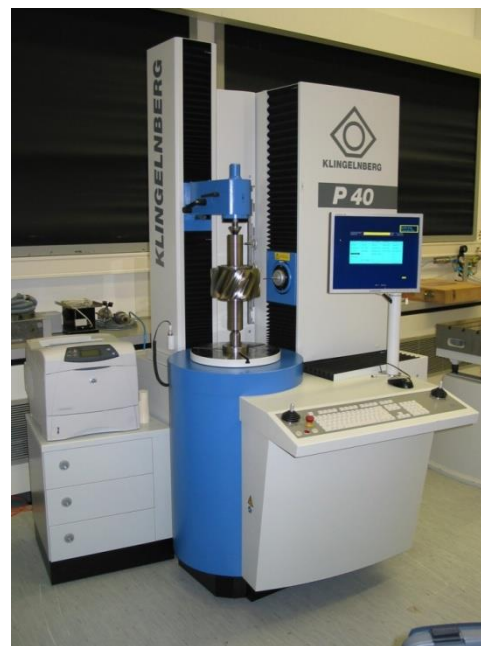
- ★ **单**品种、**单**参数 → 一台仪器；典型仪器：单盘渐开线检查仪；
- ★ **单**品种、**多**参数 → 一台仪器；典型仪器：齿形、齿向检查仪；
- ★ **多**品种、**多**参数 → 一台仪器；典型仪器：齿轮测量中心、多维测量中心、等。

5、齿轮测量主导仪器

齿轮测量的现状



三坐标测量机

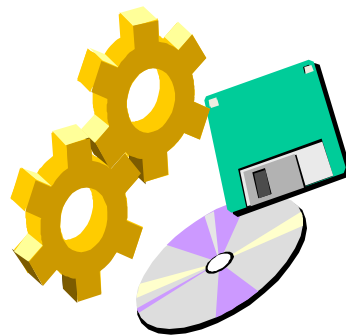


齿轮测量中心

6、我国齿轮测量现状

- 我国企业齿轮测量的总体水平：**达到国际水平**
- 在役仪器：

数控齿轮测量中心	2500多台
机械式齿轮仪器	1100台左右
齿轮整体误差测量仪	近100台
- 齿轮在线测量机应用已经起步
- 量值传递与统一存在较多问题



7、国内外齿轮测量技术比较

国外：

1. 基于电子展成方法的中小模数齿轮测量技术已经成熟，典型仪器CNC齿轮测量中心得到普遍应用，测量精度稳定在3级，部分项目可达2级；
2. 大齿轮测量通常采用大型齿轮测量中心和三坐标测量机，可测齿轮直径已达6米；
3. 集成在齿轮机床上齿轮在机测量系统已成为机床（特别是大型磨齿机）的组成部分；
4. 耦合在齿轮生产线上、结合机械手自动上下料的齿轮快速分选测量机成为车辆齿轮现场测量的主导设备。

7、国内外齿轮测量技术比较

国内：

1. 中模数齿轮测量中心相对成熟，测量精度稳定在4级，部分项目可达3级；
2. 最大齿轮测量中心的可测齿轮直径为2米；
3. 集成式在机测量系统已成为机床的重要部件；
4. 耦合在车辆齿轮生产线上的齿轮快速分选测量机已投入生产；
5. 我国独创的齿轮整体误差测量仪器近20年没得到发展，其传统应用市场不断在缩小；
6. 没有满足齿轮测量的坐标测量机，小模数齿轮测量仪器和大齿轮测量仪器几乎全部进口。

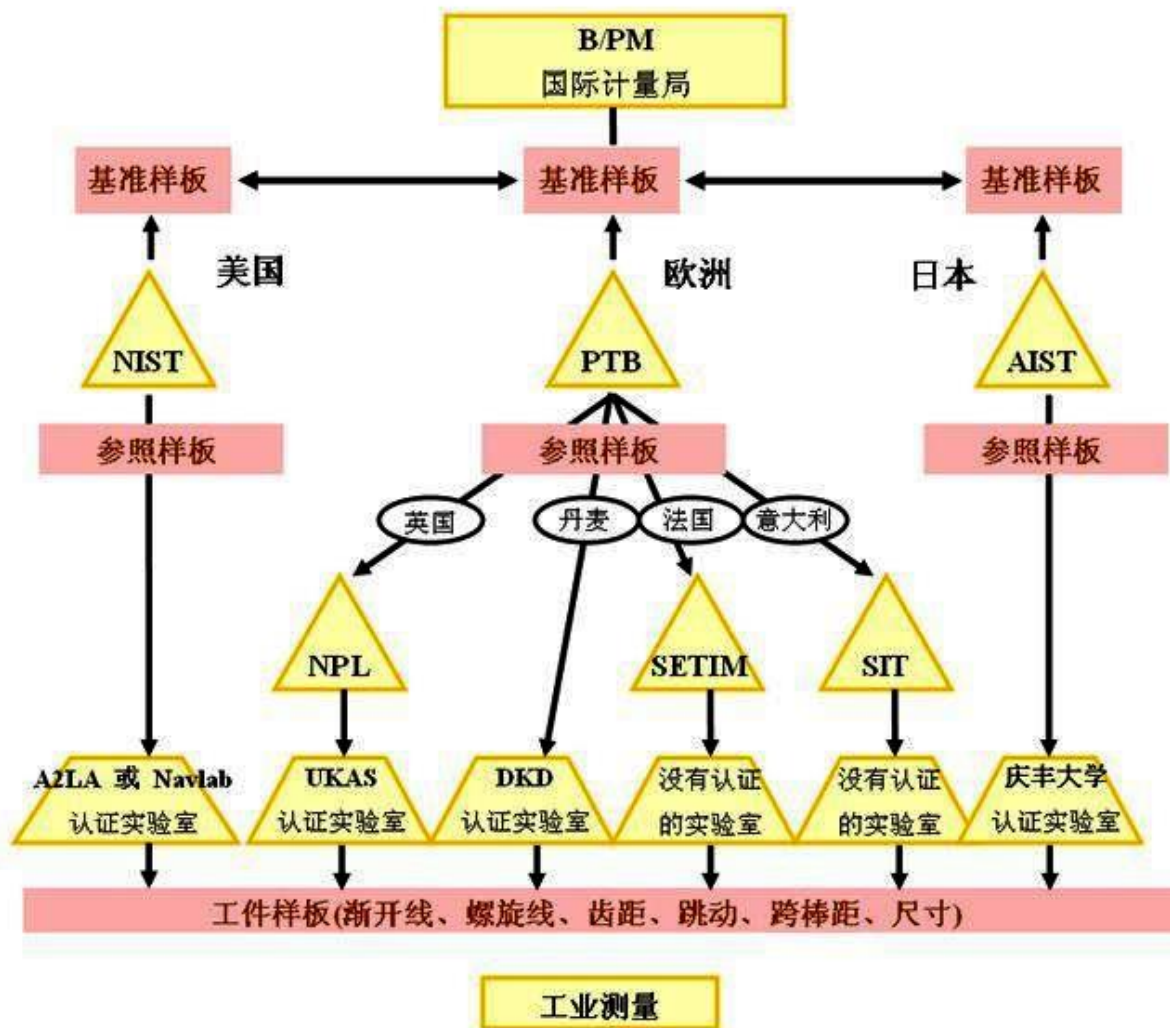
7、国内外齿轮测量技术比较

国内落后的关键技术：

1. 精密机械设计与制造技术与国外相关企业有较大差距。
 2. 关键单元组件（如直线电机、精密测头等）依赖进口，齿轮测量专用三维精密测头处于起步阶段，微型测杆不能生产。
 3. 齿轮测量与齿轮设计和加工构成闭环制造系统，其基本理论研究不够，实践缺乏。
- ◆ 国内外：微型齿轮和特大齿轮（直径6米以上）测量是技术难题，处在探索中。大齿轮量值传递是世界性难题。

8、齿轮量值传递与溯源问题

8.1 国际齿轮量值传递系统



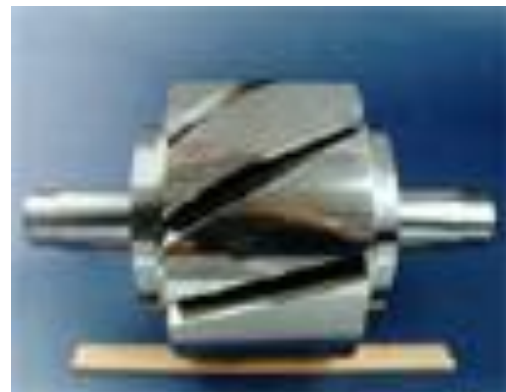
8、齿轮量值传递与溯源问题

8.2 样板及测量的现状

- 齿轮样板问题？
- 齿轮样板测量问题？ 基准仪器？

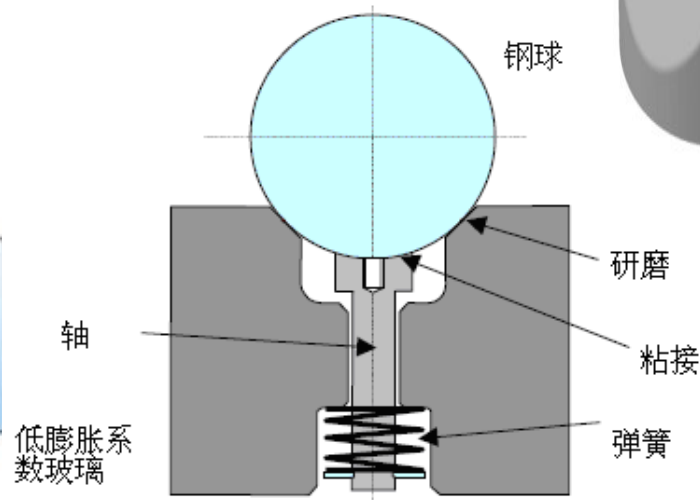
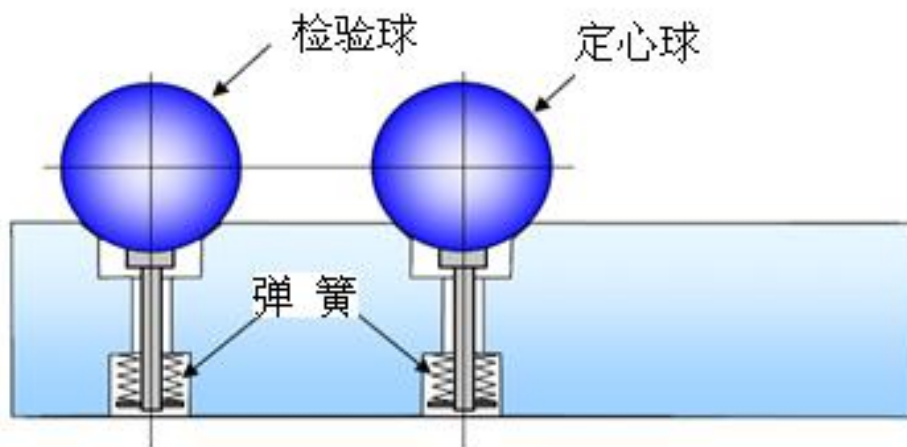
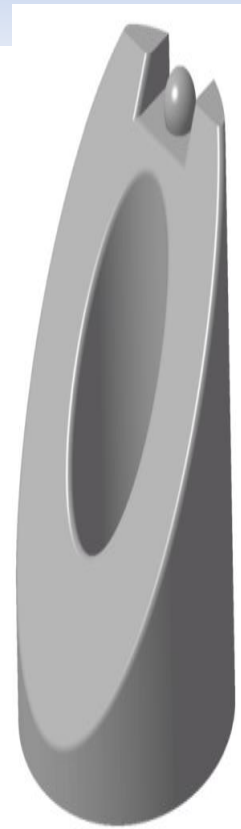
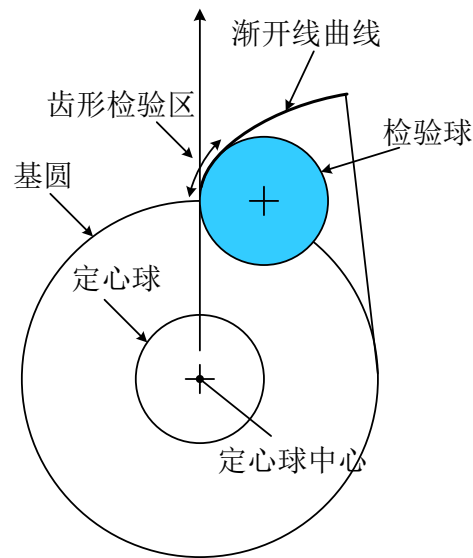
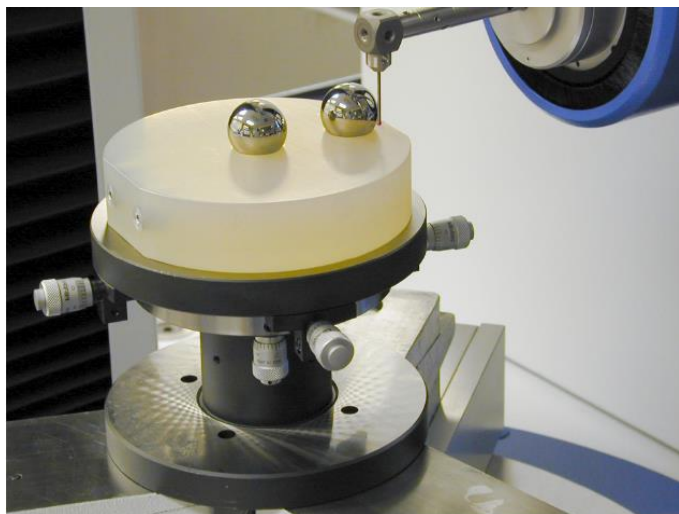


如何保证齿轮量值的统一？

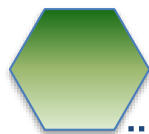


8、齿轮量值传递与溯源问题

8.3 研究进展：非渐开线样板



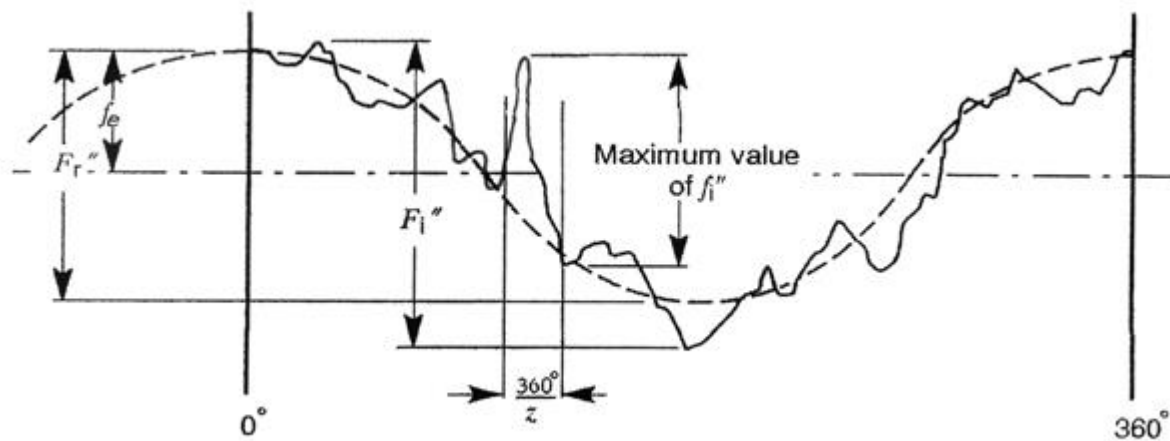
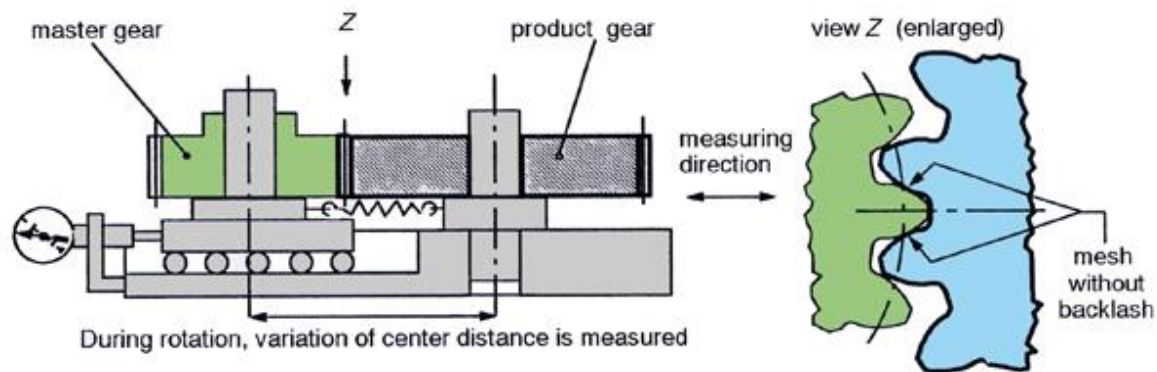
提纲



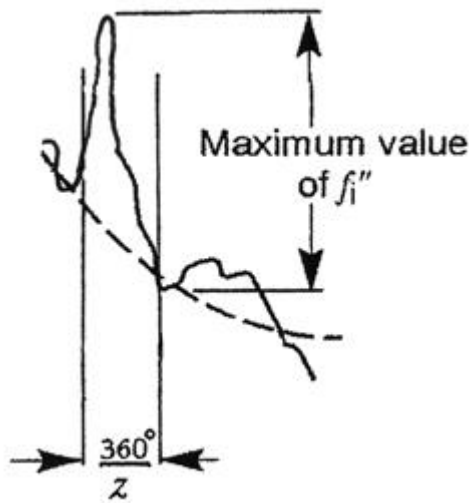
三、结果解读

- 1、齿轮啮合原理;
- 2、渐开线与基圆的关系;
- 3、工艺方法;
- 4、具体的机床、工具、安装方式等。

1、通过双啮测量找毛病



情况1: Large f_i'' and Uniform Tooth-to-Tooth Errors



- 1) The large f_i'' is typically a dirty condition or a nick on a gear tooth. Nicks are normally caused by material handling problems. Adding a tip chamfer to the design of the gear tooth profile, and hob, will reduce this type of damage.

2) A uniform but excessive tooth-to-tooth error that repeats each $360^\circ/Z$ (where z is the number of teeth in the part) is typically caused by the cutting tool and involute error.

a) The hob has not been mounted correctly, or the hob arbor is damaged.

b) The hob has been sharpened incorrectly.

c) Poor quality hob.

d) The hob was shifted beyond its useful face width and is no longer generating the involute correctly. This may occur on one flank and will thus indicate an error in one direction of rotation.

3) Tooth-to-Tooth error can be caused by the hobbing machine.

a) The hob spindle has axial and/or radial runout.

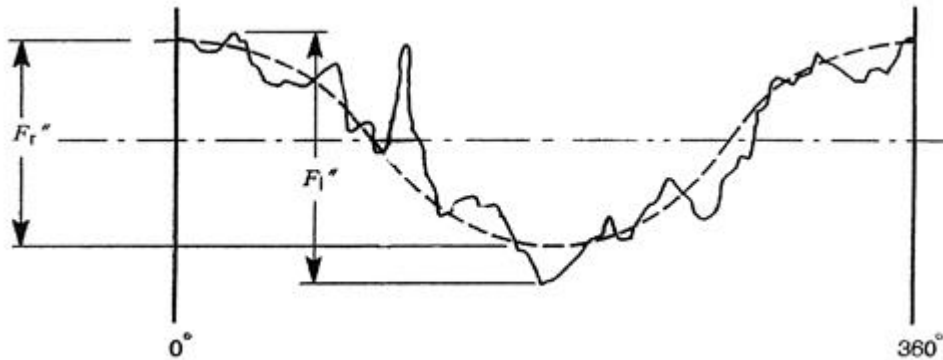
b) End support for the hob arbor is damaged or worn.

c) Improper installation of index change gears on a mechanical hobbing machine.

Composite Condition #2: Non Uniform Tooth-to-Tooth Errors

- 1) The hob is worn.
- 2) The hobbing machine work spindle index drive system is damaged, worn, or has excessive backlash.
- 3) The index change gears are damaged or installed improperly on a mechanical hobbing machine.

情况3, F_i'' 大



- 1) The work piece blank has radial run-out or the blank has face wobble, resulting in excessive axial runout.
- 2) The work piece mounting fixture has radial or axial runout.
- 3) The gear teeth have excessive lead variation.
- 4) The hobbing machine work spindle or index drive system is worn or has runout.

Composite Condition #4: Once per Revolution Non Uniform Error

- 1) The index change gears are damaged or installed improperly on a mechanical hobbing machine.
- 2) The hobbing machine work spindle or index drive system is worn or has runout.

2、齿廓偏差

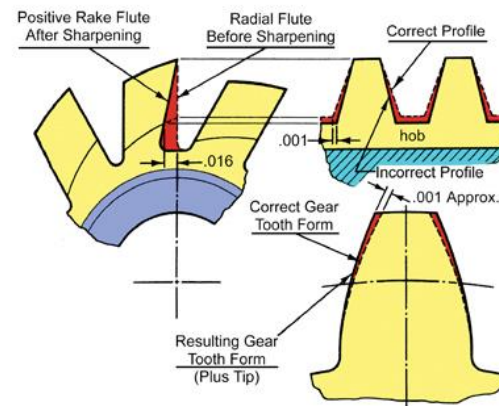
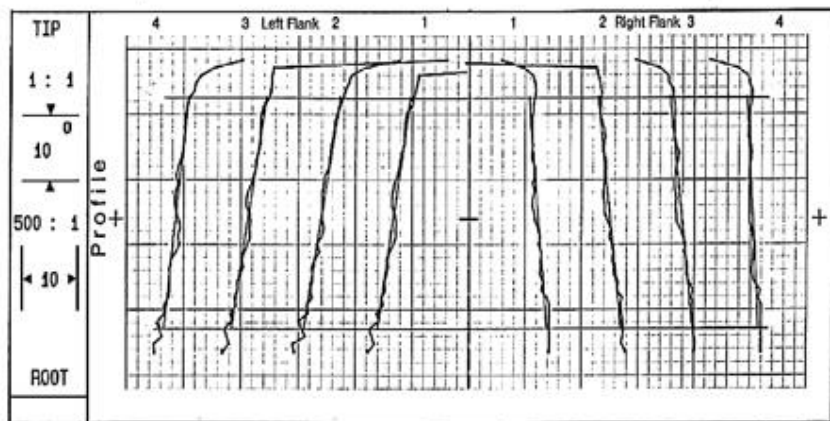


Figure 7: Profile Inspection with negative tip tooth

1) Incorrect hob sharpening. The hob has been sharpened with positive rake error making the hob tooth larger toward the outside diameter and the gear tooth smaller.

2) Incorrect swivel angle setting on the hobbing machine.

3) Bad hob.

2、齿廓偏差

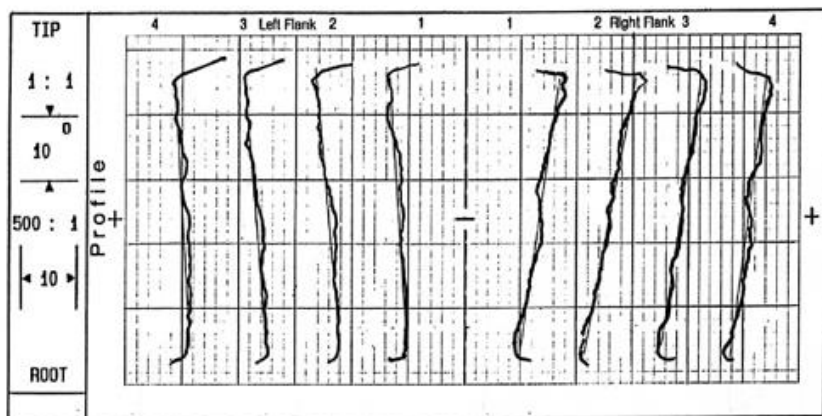
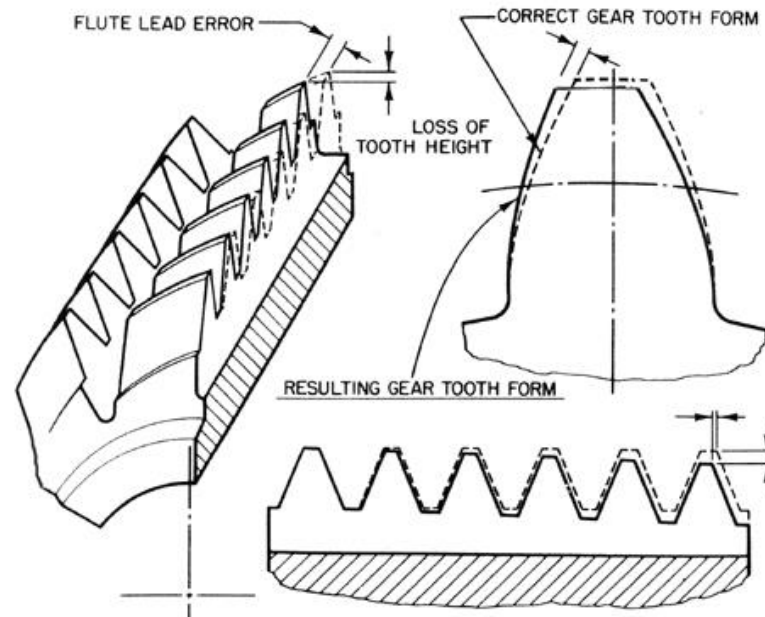
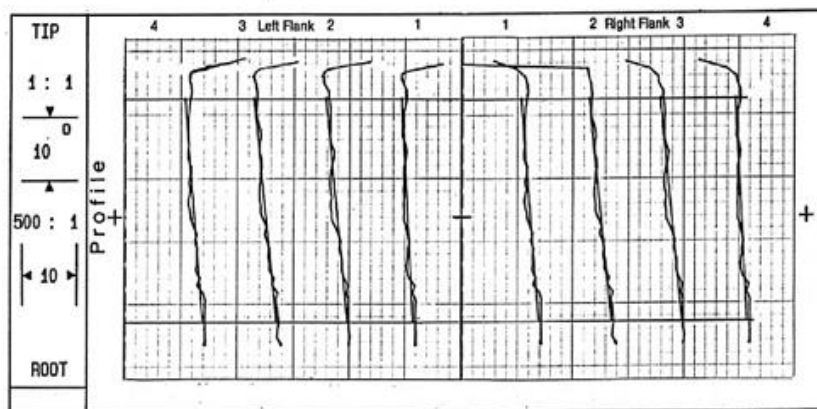


Figure 9: Profile inspection with positive tip

- 1) Incorrect hob sharpening. The hob has been sharpened with negative rake error, making the hob tooth smaller toward the outside diameter with gear tooth larger. This is the opposite of the condition shown in Figure 8.
- 2) Incorrect swivel angle setting on the hobbing machine.
- 3) Bad hob.

2、齿廓偏差

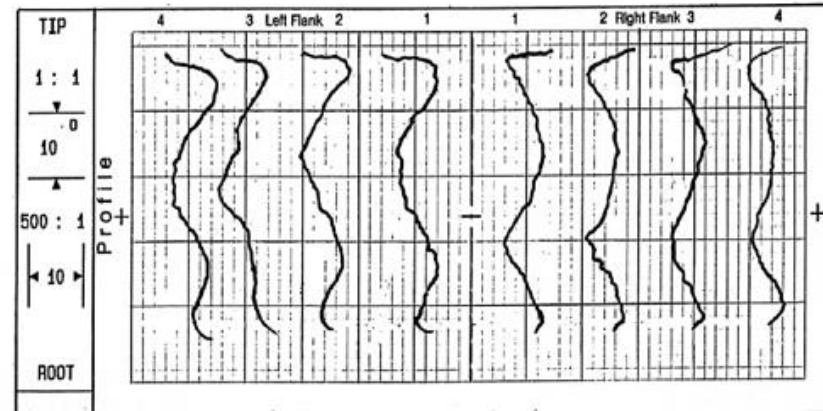


Profile inspection with leaning teeth

- 1) Incorrect hob sharpening. A hob sharpened with gash lead error will cause both a leaning profile and size change as the hob is shifted. See Figure 2.
- 2) Loose hob head swivel on the hobbing machine.

2、齿廓偏差

Profile inspection with uniform wave

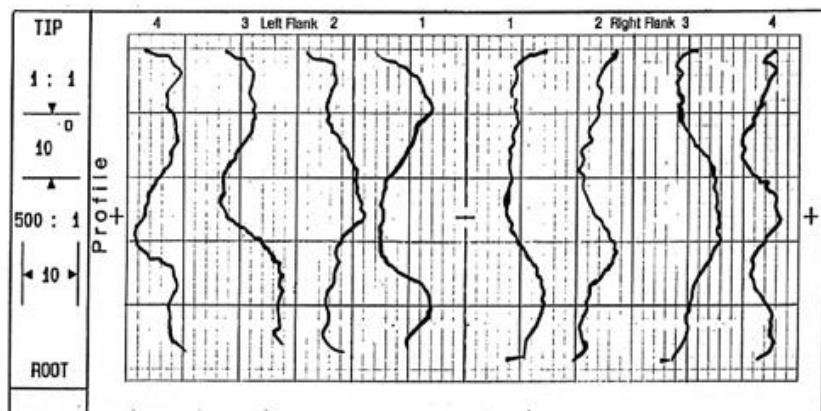


- 1) Hob had runout when mounted. The hob run-out can be caused by a bad cutter, damaged arbor, or dirty mounting conditions.
- 2) Incorrect hob sharpening. The hob was sharpened with runout during the mounting on the sharpening machine or sharpening

arbor. Extreme gash to gash spacing error on the hob.

- 3) A loose or worn hob arbor end support on the hobbing machine.
- 4) Excessive backlash in the hob spindle system on the hobbing machine.
- 5) Excessive backlash in the work spindle system on the hobbing machine.

2、齿廓偏差



Profile inspection with non-uniform wave

- 1) A loose or worn hob arbor end support on the hobbing machine.
- 2) Excessive backlash in the hob spindle system on the hobbing machine.
- 3) Excessive backlash in the work spindle system on the hobbing machine.
- 4) Hobbing machine system in poor overall condition.

3、螺旋线偏差

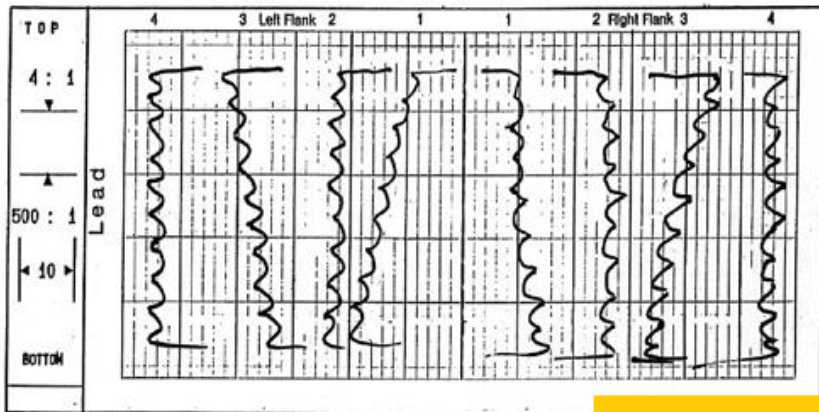


Figure 13: Helix inspection with wobble

- 1) Part blank bore not perpendicular to the face of the blank.
- 2) Part blank faces not parallel.
- 3) Fixture not accurate, or misaligned.
- 4) Tailstock misaligned, or center loose or damaged on the hobbing machine.
- 5) Inspection arbor problem.
- 6) Worm spindle bearing problem on the hobbing machine.

3、螺旋线偏差

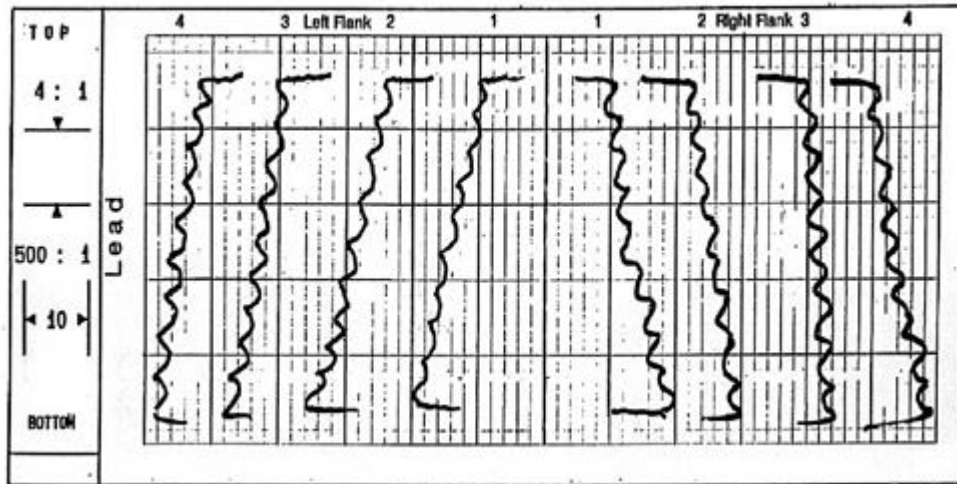


Figure 14: Helix inspection with taper

- 1) Tailstock misaligned on the hobbing machine.
- 2) Hobbing machine misaligned.

3、螺旋线偏差

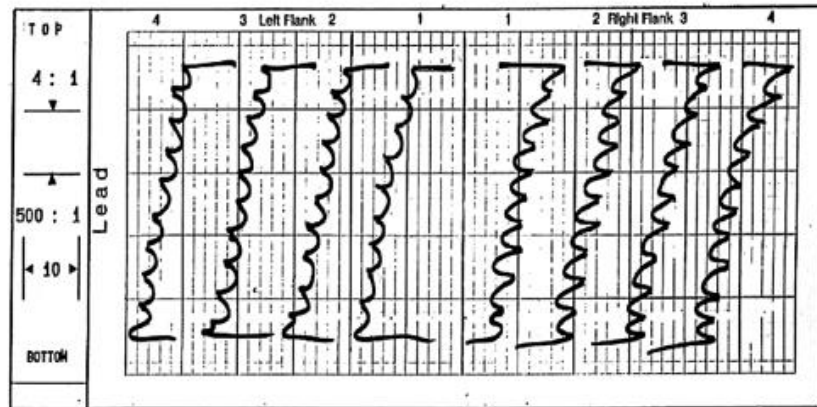


Figure 15: Helix inspection with angular error

- 1) Tailstock misaligned on the hobbing machine.
- 2) Hobbing machine misaligned.
- 3) Incorrect differential change gears or helix value (CNC).
- 4) Loose or work hob arbor end support on the hobbing machine.
- 5) Incorrect helix checking machine settings.

3、螺旋线偏差

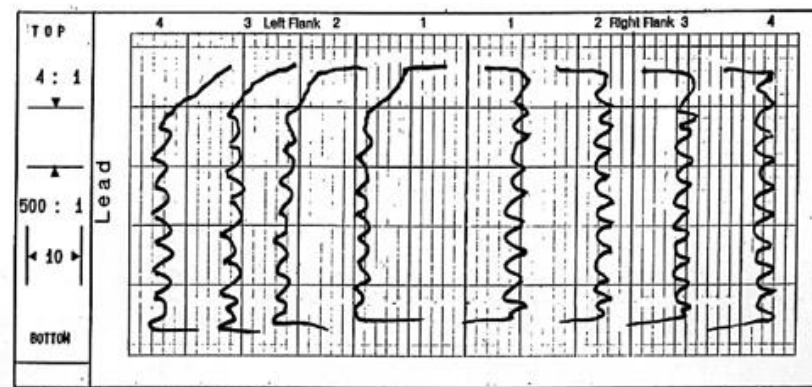


Figure 16: Helix inspection with breakout error

- 1) Tailstock loose or worn.
- 2) Part slipped in the fixture.
- 3) Fixture not clamped properly.
- 4) Hob arbor end support improperly installed or worn on the hobbing machine.
- 5) Hob saddle gibs out of adjustment.
- 6) Backlash in the cutter spindle drive system on the hobbing machine.
- 7) Backlash in the work spindle drive system on the hobbing machine.

3、螺旋线偏差

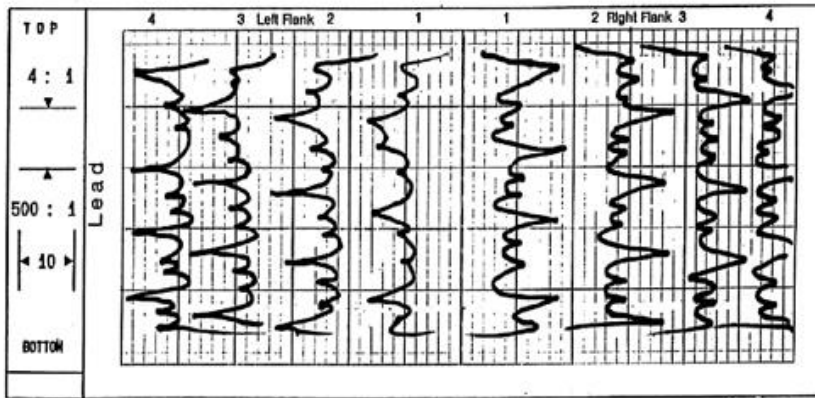


Figure 17: Helix inspection with periodic error

- 1) Runout of multiple thread hob.
- 2) Thread to thread spacing error on multiple thread hob.
- 3) Feed screw or bearings of the feed screw on the hobbing machine.

Thank You

<http://www.chinagear.cn>