

舰船减速齿轮装置的 加工与设计

JIAN CHUAN JIANSU CHILUN ZHUANGZHI
DE-JIAGONG YU SHEJI



余放 王明为 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



NUAA2013052579

U664
1047-2

舰船减速齿轮装置的 加工与设计

余放 王明为 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

2013052579

图书在版编目(CIP)数据

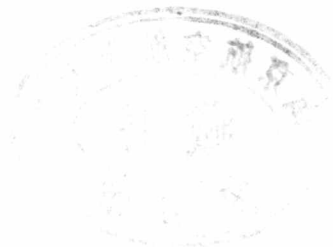
舰船减速齿轮装置的加工与设计 / 余放, 王明为编著.

北京: 国防工业出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 05997 - 7

I. 舰... II. ①余... ②王... III. 船用减速齿轮箱
IV. U664.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 156722 号



※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 710 × 960 1/16 印张 14 字数 246 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

舰船减速齿轮装置是舰船动力系统的关键设备之一,通过它螺旋桨可以获得合理的转速使得推进效率达到最佳,各种联合动力推进方式及其优化的布置方式也需通过减速齿轮装置才能实现。

近现代舰船减速齿轮装置的改进主要体现在以下几个方面:

(1) 齿轮磨削加工精度的提高。由于通过剃齿和磨齿的修形,使得渐开线齿形更加精确,且齿面精度更高。

(2) 轮齿材料的改进。从镍钢小齿轮和碳钢大齿轮的组合到全淬透合金钢的组合,即从所谓“软—软”改进为表面硬化齿轮的“硬—硬”,而硬齿面小齿轮和软齿面大齿轮的组合(“软—硬”)是中间过渡阶段。

(3) 通过齿轮材料的改进和齿轮装置的全负荷试验检测,大大提高了轮齿的承载能力和齿轮装置的可靠性。具有自动离合功能的联合动力装置的装舰使用,促进了大功率可倒车齿轮箱及大功率可调螺距螺旋桨的研发。

(4) 齿轮装置的对中技术。在功率大、转速低,轴系长度较短、刚度较大,而且船体变形较大的情况下,要解决轴系的对中问题,采用3D有限元法对艏部船体结构及主机、齿轮装置和推力块的基座进行分析,以便获得最佳的设计及最佳的轴系轴承布置,目的就是要保证大齿轮前后轴承受力均匀,这是确保齿轮装置内部对中良好的基本条件。

(5) 齿轮装置的弹性安装技术。船体易变形与中间轴刚度大的矛盾,可以通过在大齿轮与弹性支承的箱体之间,或者在齿轮箱体与发动机箱装体之间采用柔性万向联轴节、膜盘联轴器等手段来解决。齿轮装置内部的对中通过对称设计或加强箱体刚性(3点~4点支承)来保证。

(6) 减速齿轮装置的布置技术。通过采用不同传动布置形式来满足机舱层高对于减速齿轮装置的要求,如功率分支式布置:当多台主机联合工作时,一级减速可采用行星齿轮传动,二级减速采用平行轴的组合布置方式。对于螺旋桨转速很低的情况,采用三级减速设计,既可以采用功率分支式布置,也可以采用行星传动/平行轴传动组合布置。

(7) 柴油机动力装置的减速问题已经得到了很好地解决,单机驱动采用行星齿轮传动,多机联合驱动采用平行轴齿轮传动,上述方式均可实现倒车。

(8) 在包括润滑系统设计、轴承设计、振动分析、噪声、渐开线轮齿运动润滑分析,以及对点蚀和胶合机理的认识等方面都有了很大的发展。

上述问题也是现代舰船动力系统及减速齿轮装置的设计师特别关注的问题。本书通过6个章节,针对包括上述问题在内的舰用减速齿轮装置的加工与设计过程中可能涉及的各种主要问题及解决方案、技术发展以及某些基本工作原理进行了论述,使读者能够在最短的时间内对现代舰船减速齿轮装置领域的主要技术问题及其解决途径有一个基本了解。我们相信:对于那些有着丰富设计经验的设计师而言,本书中简要的论述,可能正是他们多年设计经验的总结或者是正在研究的问题的答案。本书试图以最简洁的文字说明提出的各种问题。

余放研究员、王明为高工完成了全书的策划并编了第一章和第六章,颜克君研究员编写了第二章及第三章,徐振忠研究员编写了第四章,刘春梅研究员编写了第五章,全书由常山研究员审核、徐振忠研究员审定。

本书主要供舰船减速齿轮装置及舰船动力装置设计师、舰船动力系统及设备研制的管理者、使用者等专业人员使用,还可用作船舶、电力、化工、矿山、冶金等行业科研工程技术人员及大专院校相关专业师生的参考书。

本书在编写过程中,参考或引用了诸多学者的著作和研究成果,由于篇幅所限,不能一一列出,谨在此对他们表示感谢。

编者

2008年2月2日于北京

目 录

第一章	国外舰船减速齿轮装置近代加工技术回顾	1
第二章	国内舰船减速齿轮装置的加工设备	10
2.1	概述	10
2.2	箱体的加工设备	11
2.2.1	国产卧式镗床系列	11
2.2.2	国产卧式落地镗床系列	11
2.2.3	引进卧式落地镗床	11
2.2.4	国产系列单柱卧式坐标镗床	11
2.2.5	国产系列双柱立式坐标镗床	11
2.2.6	国产系列龙门铣	12
2.2.7	柔性系统	12
2.3	齿轮的加工设备	13
2.3.1	综述	13
2.3.2	齿轮的机械加工设备	15
2.3.3	齿轮的材料及热处理设备	17
2.3.4	齿轮的检测设备	20
2.4	轴类零件的加工设备	20
2.4.1	国产系列卧车	20
2.4.2	国产系列外圆磨床	21
2.4.3	国产系列数控轧辊磨床	21

2.4.4	国产系列花键轴磨床	21
2.4.5	国产系列无心磨床	21
2.5	摩擦片的加工设备	21
2.5.1	摩擦离合器简介	21
2.5.2	摩擦片工艺及关键设备	22
2.6	蜗杆的加工设备	22
2.6.1	典型蜗杆的加工	22
2.6.2	国产系列磨削蜗杆专用机床	22
2.7	锥齿轮的加工设备	23
2.7.1	国产系列直齿锥齿刨齿机	23
2.7.2	国产系列弧齿锥齿铣齿机	23
2.7.3	引进弧齿锥齿铣齿机	23
2.7.4	引进弧齿锥齿磨齿机	23
2.8	齿轮箱装配试验设备	23
2.8.1	动平衡机	23
2.8.2	水力测功器	24
2.9	进口大型磨齿机	24
第三章	舰船减速齿轮装置的加工过程	26
3.1	箱体的加工过程	26
3.1.1	箱体的关重特性分析	26
3.1.2	箱体工艺流程	27
3.1.3	关重工序的工艺控制	28
3.2	齿轮的加工过程	30
3.2.1	齿轮的重要特性分析	30
3.2.2	渗碳淬火齿轮工艺流程	31
3.2.3	关重工序的工艺控制	33
3.3	轴类零件的加工过程	37
3.3.1	轴件的重要特性分析	37
3.3.2	轴件工艺流程	37
3.4	摩擦离合器齿轮的加工过程	40

3.4.1	摩擦离合器齿轮部套的特性分析	40
3.4.2	摩擦离合器齿轮部套的组装加工工艺流程	40
3.5	齿轮箱的装配过程	43
3.5.1	装配重要特性分析	43
3.5.2	装配工艺流程	43
3.5.3	重要工序控制	44
3.6	试验	46
3.6.1	试验流程	46
3.6.2	试验项目	47
第四章	船用减速齿轮装置设计要点	48
4.1	概述	48
4.2	一般设计要求	51
4.2.1	正倒车设计	51
4.2.2	机—桨转向匹配	51
4.2.3	倒车能力	51
4.2.4	输入端联接	52
4.2.5	环境条件	52
4.2.6	齿轮精度	52
4.2.7	齿轮材料	52
4.2.8	齿轮强度	52
4.2.9	动平衡	53
4.2.10	可靠性	53
4.2.11	寿命	53
4.2.12	维修性	53
4.2.13	超扭能力	53
4.2.14	主推力轴承	54
4.3	功能设计与配套设计	54
4.3.1	功能设计	54
4.3.2	配套设计	55
4.4	柴油机减速齿轮传动装置	58

4.4.1	离合型齿轮箱	59
4.4.2	倒顺离合型齿轮箱	59
4.4.3	双速倒顺离合齿轮箱	60
4.4.4	船用柴油机多机并车齿轮箱	61
4.5	船用涡轮机减速齿轮传动装置	62
4.5.1	船用大功率涡轮机齿轮	62
4.5.2	船用蒸汽轮机减速齿轮箱	63
4.6	柴—燃联合动力传动装置	66
4.6.1	CODOG 传动装置	66
4.6.2	CODAG 传动装置	67
4.7	燃—燃联合动力传动装置	67
4.8	CCG 传动装置	68
4.9	低噪声齿轮箱设计要点	71
4.10	主齿轮箱设计要点	72
第五章	舰船减速齿轮装置的设计过程	75
5.1	概述	75
5.2	设计过程	75
5.2.1	设计评审	76
5.2.2	传动装置的初步设计	76
5.2.3	传动装置的技术设计	81
5.2.4	传动装置的施工设计	84
第六章	国外舰船减速齿轮装置设计要点	87
6.1	齿轮载荷	87
6.1.1	齿轮载荷分布及齿轮修形修正	87
6.1.2	齿轮材料组合方式以及全负荷试验	92
6.1.3	齿轮载荷、有效标准与可靠性	95
6.1.4	单斜齿轮和人字齿轮的特点	100
6.2	对中	101
6.3	齿轮布置	109

6.4	啮合	130
6.5	行星齿轮	136
6.5.1	行星齿轮传动及其基本特征	136
6.5.2	行星齿轮在单台主推进柴油机动力 装置中的应用	145
6.6	倒车传动	150
6.6.1	汽轮机动力装置中齿轮箱的倒车	150
6.6.2	柴油机动力装置中齿轮箱的倒车	155
6.6.3	燃气轮机动力装置中齿轮箱的倒车	158
6.6.4	行星齿轮传动的倒车	163
6.7	离合器	166
6.7.1	SSS 离合器	166
6.7.2	MAAG 同步离合联轴器	172
6.7.3	联轴器	174
6.8	润滑	179
6.8.1	滤器和分油机	180
6.8.2	排气装置	180
6.8.3	冲洗	182
6.9	轴颈轴承	182
6.9.1	可调轴承座	182
6.9.2	轴承特性	184
6.10	齿轮失效	193
6.10.1	滑油与齿轮胶合	193
6.10.2	点蚀与断齿	195
6.10.3	齿轮失效举例	198
6.10.4	配对齿的磨损过程	201
6.11	齿轮噪声	202
6.11.1	噪声的产生	202
6.11.2	降低齿轮噪声的方法	203
	参考文献	209

第一章

国外舰船减速齿轮装置近代加工技术回顾

第一套船舶推进用减速齿轮装置由美国的 de Laval 公司于 1889 年研制成功,并被用于 15hp (1hp = 735W) 的汽轮机,该齿轮装置采用人字齿、二级减速,转速从 16000r/min 减至 330r/min,通过齿轮装置实现主机和螺旋桨转速的优化匹配。

随后,de Laval 公司又生产出高质量的滚齿机,在其他相关公司也相继加入到该产品的生产行列以后,高精度齿轮装置开始被大规模地制造。1910 年,Parsons 船用汽轮机公司将第一套大型高速齿轮装置安装到 S. S. Vespanian 号船上。

图 1-1 所示为正在加工汽轮机用齿轮的滚齿机。滚齿机的三个主要加工运动是:工件台转动;滚刀转动;滚刀架的线性往复移动,其自身以及相互间的运动关系必须精确。

在 20 世纪 10—20 年代,齿轮传动是令人生畏的难题。产生问题的主要原因是齿轮的加工精度不高而且质量不稳定,加之装船后对中不良,导致常常发生点蚀、齿面磨损、胶合、擦伤、啮合噪声和轮齿折断等严重问题。查尔斯爵士认为插齿机分度盘的周期性误差会在斜齿轮齿面产生“高点”(或“突起”),并沿啮合线向齿顶倾斜,这种状况最容易产生啮合噪声,其扰动频率与分度盘上的齿数相关。

剃齿过程中,如有必要可进行小的调整,根据齿面接触情况确定最终调整量。齿轮加工刀具轴带有制动器时,只可在轮齿的一个齿侧进行剃齿加工。

Parsons 公司据此创建了校正滚齿机的“高点校正表”。通过校正来重新分布由于滚齿机蜗轮—蜗杆机构的周期性误差引起的高点,这些高点在被加工的齿面

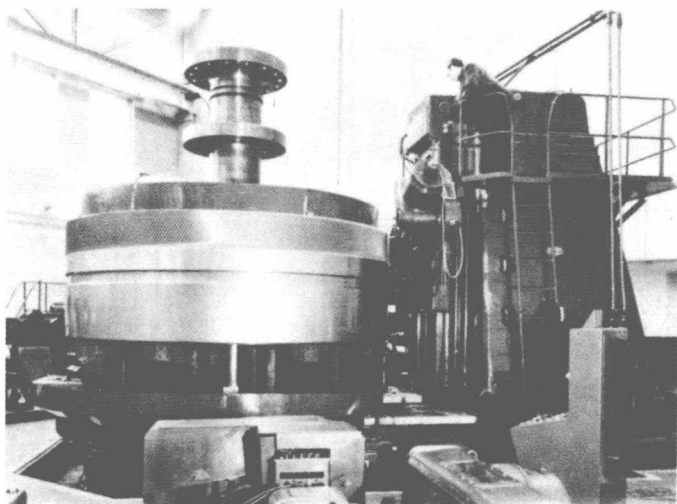


图 1-1 正在加工汽轮机用齿轮的滚齿机

上呈螺旋状分布。然而,仅仅分散这些误差是不够的,必须将它们消除或减小。

1914 年—1918 年,滚齿机的发展受到了影响。然而,在美国仍有少数几家公司(如 de Laval 公司、G. E 公司和西屋公司)能够采用高质量的滚齿机制造二级减速齿轮装置。图 1-2 所示为二级小齿轮和大齿轮啮合。其他大多数制造商仍然未能解决两级减速齿轮装置的难题,其设计局限于一级减速齿轮装置。

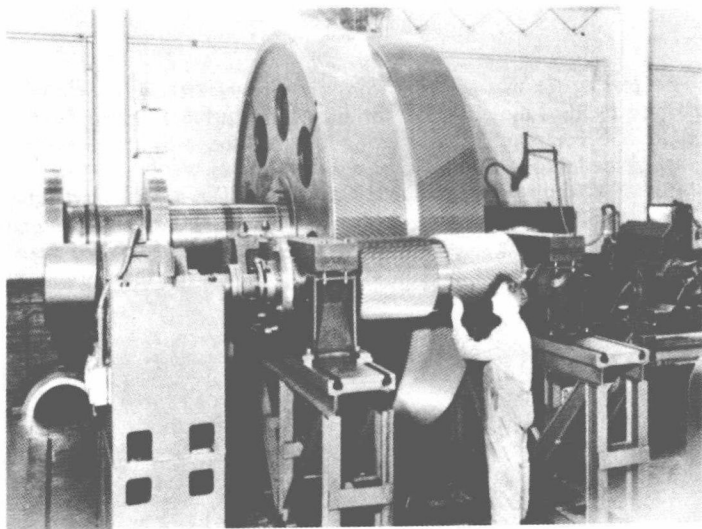


图 1-2 二级小齿轮和大齿轮啮合

在当时以汽轮机驱动的商业船上,两级减速齿轮装置为分置联接设计(可以在第一级也可以在第二级传动齿轮上采用功率间隔分置),参见第六章图 6-21、图 6-22、图 6-23 和图 6-24。

除齿轮轮齿误差外,由螺旋桨、轴系、齿轮箱和汽轮机所构成的系统的扭转振动亦是很棘手的问题。在某些情况下,可以通过调整上述系统使齿轮箱成为一个振动节点,这样至少可以消除“齿轮捶击”。为减少因轮齿啮合产生的问题,采用了全齿顶高(AA)和 Vickers - Bostock - Bramley (VBB) 齿形设计,但齿轮加工不精确的问题仍未解决。当时齿轮的累计基节误差要求的量级是 $5 \times 10^{-3} \text{ in}^{①}$ ($125 \mu\text{m}$),现在则要求小于 $5 \times 10^{-4} \text{ in}$ ($12.5 \mu\text{m}$)。这些进展对船用汽轮机工业产生了巨大的影响,对此,戴维斯博士 1974 年在其纪念 Parsons 公司的商业讲演中十分生动地进行了描述。

滚刀倾斜一个角度使其导程线与被加工轮齿的螺旋线平行,滚刀采用渐开线螺旋蜗杆形式,蜗杆开槽以保证切削刃,其表面为部分渐开线螺旋面。滚刀按适当的切削速度旋转,齿坯转动的速度应保证加工好的齿轮能与以滚齿速度转动的蜗杆啮合。

图 1-3 所示为带有通用滚刀支架的 Pfauter 滚齿机正在滚齿加工斜齿轮。

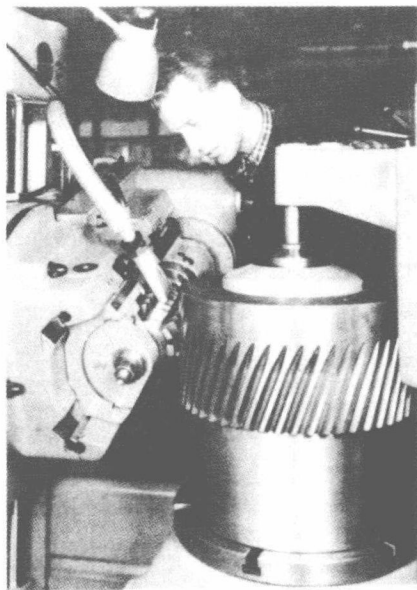


图 1-3 带有通用滚刀支架的 Pfauter 滚齿机正在滚齿加工斜齿轮

① $1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$ 。

到 1939 年,美国海军采用了“功率分支闭锁结构”设计的人字齿轮以增加减速齿轮装置的功率/质量比,这必须采用能够保证齿轮表面加工精度的高质量滚齿机才能做到。随后,英国海军部提出了齿轮精度目标,并写入英国标准 B. S. 1498 “用于加工汽轮机及类似驱动机械齿轮的滚齿机”和 B. S. 1807 中。拥有相关研究设施的大型汽轮机公司和齿轮公司与国家物理实验室测量部联合共同攻关,提高齿轮加工精度。

从图 1-4 中可看到环形的带陡角锥形分度平台和大齿数的蜗轮。

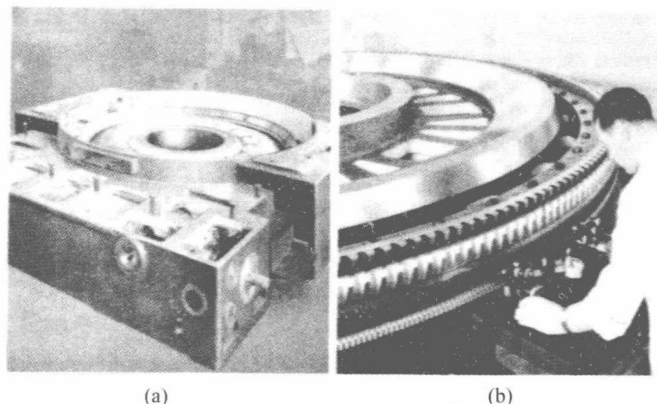


图 1-4 Schiess 滚齿机基座(左)和主蜗轮(右)

利用这些有益的研究成果,研制成功了具有更多齿数(500 齿 ~ 1000 齿)的主蜗轮/蜗杆机构,使工作台转动稳定,而且滚刀连续切削时产生的高点由于周期误差的大大减小而减少,同时也减少了由于高点带来的不良影响。高精度螺杆的采用,有效提高了滚刀台架线性往复移动和滚刀转动的精确性。因此,随着滚刀切削刃的增加及工件每转时滚刀进给量的更加精确,范成加工轮齿时产生的与理论齿廓的偏差可以达到忽略不计的程度,齿轮表面的加工精度也更高,如图 1-1 ~ 图 1-4 所示。

如图 1-5 所示,刀齿螺旋角大小的选择应能保证刀具与齿轮轴线成 $10^\circ \sim 15^\circ$ 角时二者可以正确啮合。

对于 UTS(极限抗拉强度)小于 $70/\text{in}^2$ 的材料,采用滚后剃齿可以进一步提高齿面精度,通过齿面修整可以保证轮齿啮合平稳和接触良好,如图 1-5 和图 1-6 所示。必要时可通过修正螺旋角来补偿小齿轮由于受载产生的弯曲和扭转变形,使齿轮副满负荷工作时轮齿沿全齿宽均匀承担载荷。这些修正量虽然很小,但很重要。按齿轮加工标准,以中心线平均值(CLA)为参考值,轮齿表面误差为:磨齿 $10\mu\text{in} \sim 20\mu\text{in}$;剃齿 $15\mu\text{in} \sim 30\mu\text{in}$;滚齿 $25\mu\text{in} \sim 40\mu\text{in}$ 。

齿面的 CLA 值定义为在规定的取样段内齿面偏差的算术平均值,包括相对中心线的正偏差和负偏差。CLA 的单位是 $\text{micro-inch} (10^{-6} \text{ in})$,可用 Talysurf

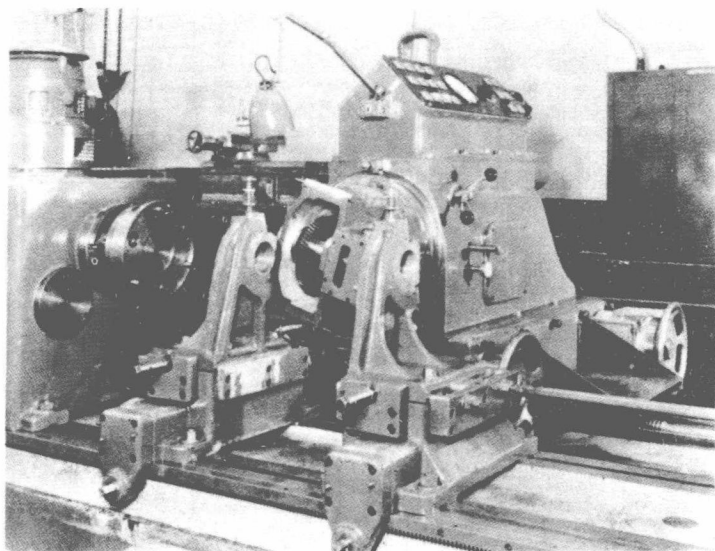


图 1-5 G. E. C. 带刀具的小齿轮剃齿机

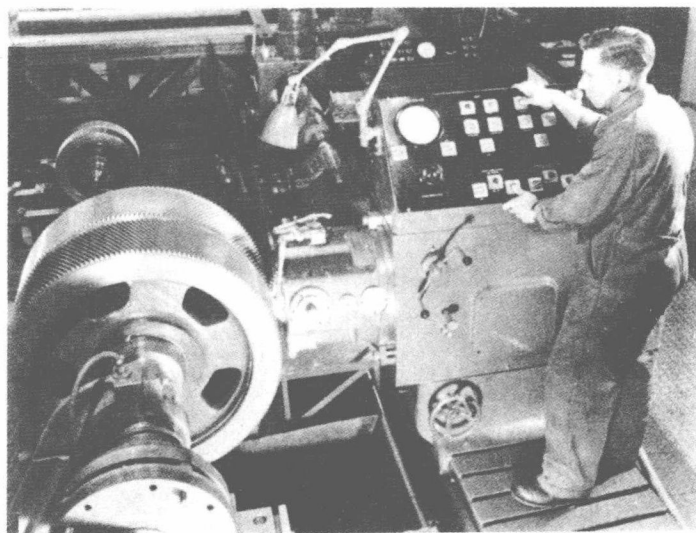


图 1-6 G. E. C. 多功能电控小齿轮剃齿机

齿面记录仪来测得齿面各点的数值。

安装在 150in 滚齿机的滚刀杆和工作台上的 N. E. L. 便携式衍射光栅测量仪,如图 1-7 所示,其系统精度为 $\pm 0.4\text{s/rad}$,最高可达总幅值误差小于 3s/rad ,该仪器亦可用于磨齿机。

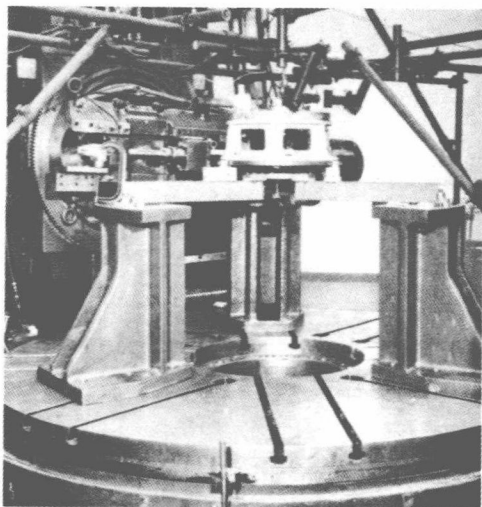


图 1-7 安装在 150 in 滚齿机的滚刀杆和工作台上的 N. E. L. 便携式衍射光栅测量仪

在图 1-8 中,记录值是 A1 级齿轮允许误差的 1/3,可参见 B. S. 1807 用于汽轮机及类似驱动机械的减速齿轮装置。

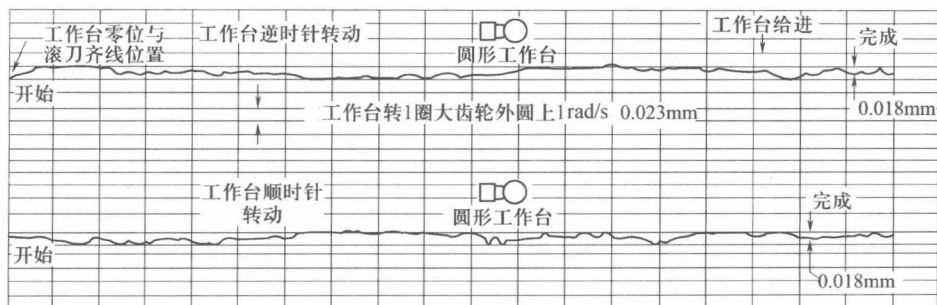


图 1-8 滚齿机修正后的记录

剃齿的效果主要取决于滚齿结果的好坏,如果滚齿的精度不高,则剃齿也不可能使其有明显改观。

滚齿机必须具有良好的结构刚度,并安装在弹性基座上,以保证隔离来自外部的影响。滚齿机要封闭在有温度控制的单元或建筑物中,温度变化在 $\pm 1^\circ\text{F}$ ^①,而且冷却油和切削液的温度也要控制并保持稳定。

① $1^\circ\text{F} = \frac{9}{5}^\circ\text{C} + 32$ 。

随着测量方法的不断改进,应用的工具也从传统的光学仪器激光干涉仪,因此,通过精密的校正便可以满足滚齿机所需的极高的测量精度。图 1-7 和图 1-8 给出了 150in 滚齿机经精密校正后的测量结果。基本成分误差幅值的双倍仍小于 3s/rad , 达到英国标准 B. S. 1498 中 A 级齿轮的精度。激光仪器和其他高精度仪器可测量到 0.5s/rad 的角位移,相当于在半径为 100in (2.5m) 划长度为 0.00025in ($6\mu\text{m}$) 的弧。

高质量的设备可以保证齿轮的加工精度达到很高的标准。例如,1968 年 Schiess 230in 滚齿机给出的累计基节误差 (齿轮转一周测一次) 为 1s/rad 。MAAG 磨齿机亦可达到相当的精度,该设备被用于加工硬齿面齿轮。

磨齿比剃齿加工精度更高,可用于热处理后的齿轮加工,如表面硬化齿轮。磨齿精度不受磨前各加工过程的影响。MAAG 磨齿加工方法是展成法。使齿胚作反复转动,用 2 个以一定螺旋角固定的碟形砂轮加工渐开线轮齿的两侧齿面。砂轮的两种不同安装方式,如图 1-9 所示。当压力角为 0° 时,磨齿基节定位带设置得与齿轮基圆重合,范成运动通过基圆旋转获得。

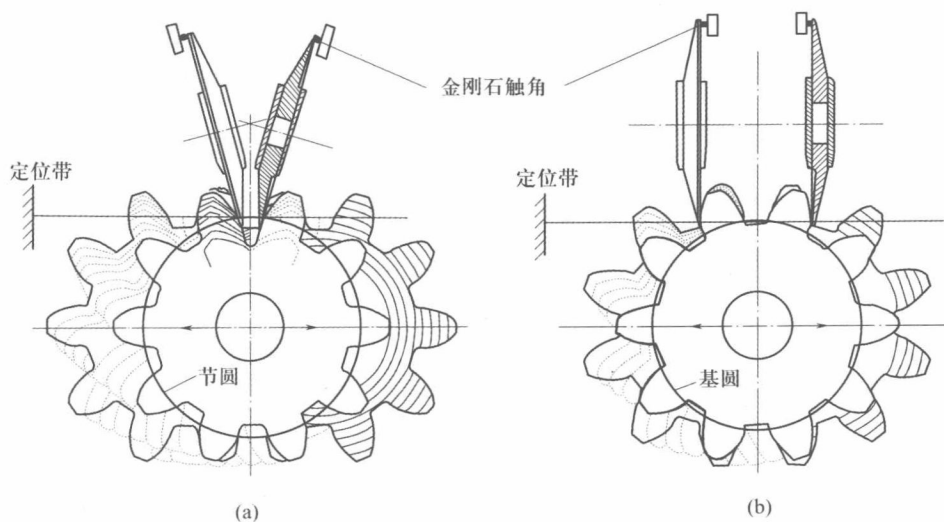


图 1-9 摆动转动展成磨齿法

采用 MAAG 磨齿机可用零度磨齿法加工齿轮,两个砂轮相互平行在平面内转动,并用其内沿加工轮齿侧表面。由于磨削压力角和基圆压力角都是 0° ,通过转动基圆即可进行范成加工。采用该方法加工人字齿轮时,两螺旋齿间要为砂轮的进给留有一定距离 (退刀槽)。这些齿轮加工设备均配有高速重载齿轮进行齿廓修形和齿向修形的机构。