

集 文 譯 教 志

前 言

为配合机械工业各部门提高齿轮技术水平，我所文献室在全面系统搜集国外齿轮文献线索的基础上，拟与各厂矿及研究院（所）协作，共同选题，围绕齿轮的各方面问题，陆续出版一套齿轮译文集。作为齿轮文集第一辑——齿轮测量专集与读者见面了。在本辑中我们收录了苏、美、西德及日本等国齿轮文献20篇，介绍了大齿轮测量、单面啮合检验及周节测量仪等方面的国外新技术。继齿轮测量第一辑后，我们还准备编辑出版齿轮噪音、大型透平齿轮、齿轮热处理及齿轮加工工艺……等译文集。编辑专题译文集，我们经验很少，水平有限，故希望各厂矿、院所、大专院校大力协助，与我们一起做好为生产服务提供技术参考资料的工作。我们希望对齿轮译文集有兴趣的单位及个人，以单位或个人名义与我们保持联系，向我们推荐译文选题，踊跃承担译校工作。最后，为加强协作，密切联系，请把你愿意承担那种文字，那方面专业的译校工作，函告我所文献室。我们在编辑齿轮译文集第一辑过程中，北京齿轮厂给我们多方面帮助，承担了大部分译校工作，借此表示感谢。

文献室 1964.11.30

目 录

- 一、大齿輪的測量……………(英国)C. Timms 等 (3)
- 二、透平齿輪周期誤差的測量……………(苏联) И. Ю. Тулецкий (12)
- 三、滾切精密齿輪齿面波紋的測量……………(民德) Wielle (18)
- 四、新型齿輪单面測量装置……………(南斯拉夫) Felix (24)
- 五、齿輪啮合检查……………(苏联) Н. Н. Марков (35)
- 六、单面啮合检查仪……………西德专利 (40)
- 七、检查齿輪的方法及装置……………西德专利 (46)
- 八、单面啮合检查仪……………西德专利 (48)
- 九、錐齿輪检查仪……………西德专利 (50)
- 十、齿輪測量仪……………美国专利 (54)
- 十一、用双触头測量齿輪精度第一部分……………(日本)石川二郎等 (58)
- 十二、用双触头測量齿輪精度第二部分……………(日本)石川二郎等 (67)
- 十三、齿輪測量仪……………(日本)小熊辰照 (76)
- 十四、周节測量仪……………西德专利 (85)
- 十五、圓柱齿輪的齿形及齿螺旋綫的檢驗……………(西德)A. Banbart (91)
- 十六、David Brown No.18 齿輪漸开綫及
螺旋角綜合檢驗仪……………(英国)G. W. Mason 等 (96)
- 十七、用圓球或圓柱測量斜齿漸开綫
齿輪齿厚的方法……………(日本)若林敏夫 (98)
- 十八、錐齿輪单項檢驗仪……………(苏联)Б. А. Тип (103)
- 十九、与齿輪大小相适应的齿形检查方法……………(日本)会田俊夫 (107)
- 二十、分度誤差測量的統計分析……………(日本)吉本勇等 (114)

大 齿 輪 的 測 量

(英国) C. timms, M.I.Mech

本文評述了周节与軸向周节，齿形与表面波紋度測量儀的設計与应用的現代发展。比較了用于在单独齿面和齿間中心綫上測量周节偏差的一些儀器所获得的結果。并且討論了表面不平度对測量精度，特別是周节积累誤差的影响。同时，对图表記錄系統及其在手提式儀器上应用作了研究。討論了滾齿机的加工精度，因为这个问题与齿輪和船用齿輪的檢驗精度有着密切的联系。文中，对未来的发展，特别是对波紋技术在齿輪装置及滾齿机誤差的測量与控制中的应用进行了研究。

齿輪的表面光洁度

表面光洁度問題大体上可分为表面組織与表面波紋度。当应用到齿輪上的时候，这样的划分与这一問題的一般发展是适合的。表面組織与刃具的切削动作有关，表面波紋度与齿輪加工机床的周期誤差有关。

与其它加工过程不同，关于由各种切齿方法所引起的表面不平度的形式与大小的情况缺乏明确的报道。这是因为在齿輪表面上直接应用触头式儀器有困难，但是复制 (replica 下同) 方法的发展，对于这个问题似乎提供了一个实际解决办法。有一些材料曾經用于制作复制品，其中包括醋酸纖維素胶片与高分子树脂，这两种都适宜于用触头式儀器作检查。图1a与1b是用高分子树脂复制方法，在平行于接触綫与齿方向測得的滾削与剃削斜齿輪齿面光洁度的記錄。这些記錄不是用于比較各种加工方法所达到的表面光洁度，而使指出表面光洁度与在 B.S.1.807:1952 年对于 A1 級齿輪所規定的尺寸公差一致。这个事实不被一般所重視，他們认为現今測量精度不仅受測量技术精度的限制，同时亦受齿輪表面光洁度的限制。因为齿面光洁度是測量齿輪各要素的基准。

近年来，用透明的复制品与适量液体的适当結合，检查表面組織的光学干扰方法的范围已經扩大，液体的折光率可使相当于直綫值的干扰带比正常值 $\lambda/2$ 大， λ 是光的波长。一些研究人員曾經成功地使用这种方法 (其中如

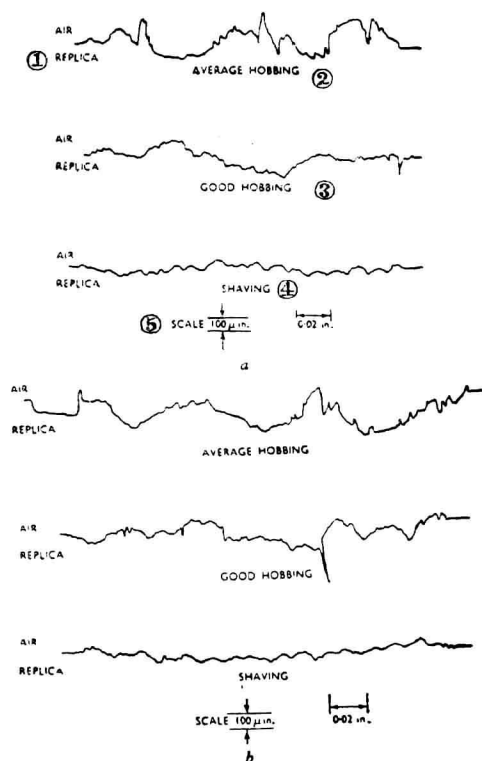


图1 用高分子树脂所得到的关于滾削与剃削的斜齿輪齿的记录
a-与接触綫平行的測量；b-与齿向平行的
1-复制品外观；2-一般滾切；3-精密滾切；4-剃削；

Dyson)，用于检查滚削与剃削的齿輪。Hagen更为細致的在同样范围使用了这种方法。这个方法使用醋酸纖維素薄胶片或 Perspex 透明复制品有很多优点。这种方法可以应用于用其他方法所不可能达到的部位，例如齿輪輪齿上。如用通常的触头方法、沿着单一接触綫也可以提供一般表面状况的局部视图。对于干扰复制品的数字解析，迄今尚没有一个标准的办法，这一方法尚没有达到普遍应用到車間的阶段。

1939年 Tomlinson 发明的輪齿波紋度記錄器在测量方面，以及在决定有爬行与无爬行机床的周期誤差所产生的表面波紋度原因方面，都証明是很有价值的。很多年来，都认为它是测量与估价波紋度的标准仪器——这一事实由1939—1945年战争以来发表在船用齿輪上面的技术論文的多次引用所証实。过去18年期间所记录的波紋度記錄，显示出量值从0.01吋下降到0.0005吋，这就反映出，在这一期间齿輪切削精度有了很大的改进。

从最近的研究結果看来，有一些迹象說明，这个仪器的灵敏度对测定精細表面的不平整并不是足够高的。最近测量表明，波形光滑，波幅度减少。图2的曲綫图可以明白地显示出这样的結果，其中的a組是用 Tomlison 仪器摄下的典型記錄，而b組是用新設計的测量仪器摄取同一齿面的典型記錄。使用后一仪器所获得記錄表明了，与这一仪器所展成的均匀螺旋綫的偏差。反过来用 Tomlison 仪器时，相同的基准表面不仅与被测齿輪的光洁度有关，同时与两个固定球对两个测量球的相对間隔有关。另外一个重要特征是灵敏度与記錄元件反应的速度。从这一方面來說，电气記錄技术优于相同的机械系統。从上述的这两个特点可以看出图2两組之間明显的差别。

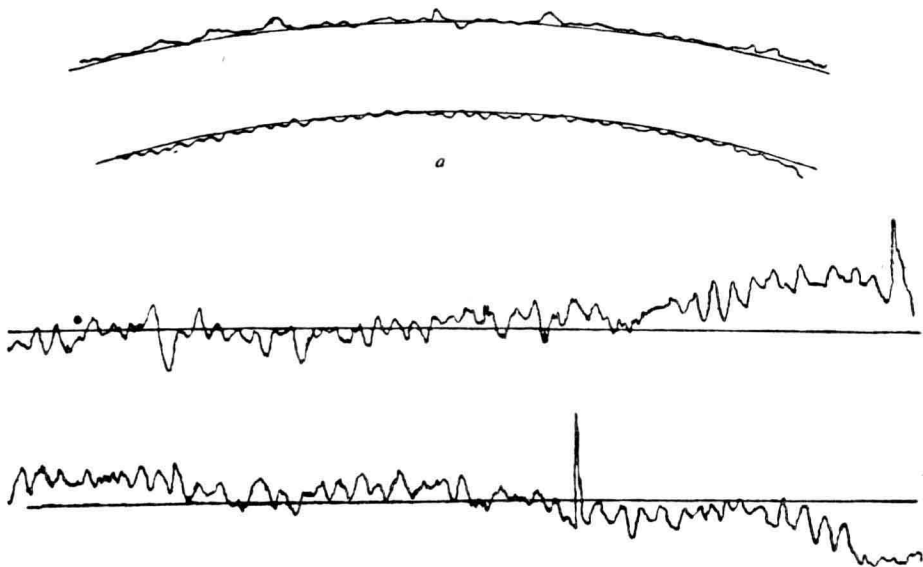


图2 波紋度記錄。橫長8，垂直放大1m=0.002吋
a用Tomlison仪器；b用新設計的仪器

1957年发明了一个精巧的輕便的波紋度测量仪。用这个仪器时，由一个有弹性的薄鋼帶的刃边形成基准表面，鋼帶包在要試驗的齿輪的頂圓上，并用若干小磁鉄将它固定在頂圓上。在使用的时候，仪器压在鋼帶边上，沿着齿面，不时記下指示表上的讀数（通常为0.1吋）。当用图表形式表示时，测量結果就可清楚看到一个，相对于鋼帶刃边形成的均匀螺旋綫的一个齿面的波紋度。当用图表形式表示测量的結果、在以鋼帶刃边形成的固定螺旋角为准时，可以提供沿着一个齿面的波度图样。看起来这个仪器用于测量齿輪較之齧輪更为

適合。為了簡化測量過程，一般需要兩個操作者。但是這一測量方法，尚有待於進一步的發展，例如以直接記錄裝置代替現有的指示表，以此，可以改進總的靈敏度和減少操作者的疲勞。這些特點已被應用於電子齒面波紋度測量儀。這個儀器在原理上與 Tomlison 記錄儀相似，它利用三球系統，如上面所說的，可以引起波紋度的平滑。放大觸頭的運動，并把運動直接記錄到圖表上。

周節誤差

現有的“角度標準”的精度，當考慮到在 B.S.1498:1954，以及在 B.S.1807:1952 為滾齒機工作台分度誤差與齒輪周節所規定的公差時，不能認為是滿意的。如 Barrel 所指出，用最好的新的圓周刻度盤，與對稱地安置在度盤周圍的兩個固定顯微鏡聯合使用，可以獲得一弧秒的精度。

用多角形成的角度標準與精密的自動准直儀聯合使用，可以獲得同樣的精度。從另一方面來說，直徑 200 吋，周節一吋的 A 級標準齒輪，相鄰周節誤差不應當超過 0.0003 吋，等於 0.6 弧秒。因此，對於這類工件，確實需要改進測量角度標準的精度。這一點也被 Newton 進行的工作所証實，他用角節規及自動准直儀對滾齒機的直徑 8 呎的蝸輪的周節誤差作了詳細調查。常用的辦法是用若干形式的周節比較儀、測量包括少數齒的各段跨距上弦寬的偏差。每一個讀數與所有讀數平均值的偏差即為每一個單獨跨距的誤差。各跨距誤差的總和就是累積誤差。用完全同樣的方法，可以決定相鄰周節的誤差。一般採用的周節比較儀可以概括地分為兩個不同的類型：齒側間的測量與齒間中心綫的測量。如在 B.S.1807 所指出的，使用前一儀器時，就必須建立徑向與軸向基面來安置比較儀。每一基面的光潔度是很高的。在製造齒輪時，這些基面與軸頸的相對位置必須正確，不然的話，這種周節測量就絲毫沒有價值。

但是，當用中心綫式比較儀時，這類的基面是不必要的，因為它是在被檢齒輪的齒間處進行記錄。這類比較儀結構比較簡單，操作方便，在某些方面不亞於測面間量儀規所宣稱的很多優點。很多年來，這種實驗室結構的周節比較儀在英國得到廣泛應用，美國也發明了結構相似的三球周節規。

但是，在這個測量過程中也有很多弱點是兩類比較儀所共有的，例如，為了獲得一個可靠的和一致的周節累積誤差，每一單獨跨距的測量就必須有高度的精度。表面不平度，操作測量壓力的變化，測量指示器的缺乏重複，以及在測量過程中溫度的變化等等，都可能引起一個指定跨距測量的偏差。為了獲得這種測量過程全面精度情況，機械工程研究實驗室曾經對節距 6，節圓直徑 28 吋的齒輪進行了一系列的廣泛的周節檢驗。將不同測量方式獲得的結果，以圖 3 中的 a 到 k 曲綫示出，並在下面作簡短的敘述。

曲綫 a 與 b 代表軸向間隔 7/16 吋的同向齒面的測量、曲綫 c 、 d 與 e ，是軸向間隔 7/32 吋的異向齒面的測量。由高精度分度盤組成的直接測量儀所獲得的結果表明，曲綫的一般波幅與形式對每一組齒面是相似的，但是相鄰周節也有 0.0002 到 0.0003 吋的局部偏差，大部分是光潔度的局部偏差。這一結果由 f 與 g 的曲綫予以証明。曲綫 f 與 g 也是在同樣的直接角測量過程中獲得的，只是以刃邊式氣動觸頭代替了球狀觸頭。如所預期，相鄰周節誤差的波幅顯示出普遍的降低，由於氣動測量裝置架於表面波峯上，故對局部表面不平度不敏感，因此，可以提供更有代表性的真正相鄰周節誤差。曲綫 h 與 i 代表用側面間比較儀的測量，測量儀在 7 與 14 齒的跨距上測得讀數。既然每一個曲綫的一般形式與直接角度測量相似，最大的

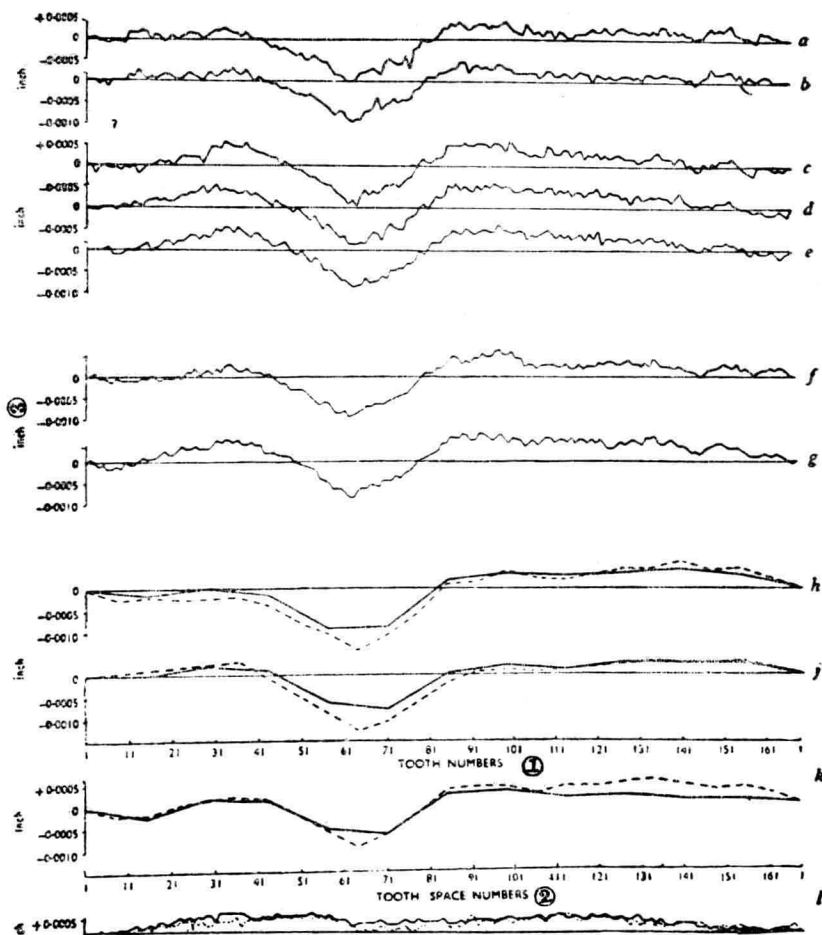


图3 周节测量：从各种测量系统所得的结果

a、b、f、h、 α 侧面；c、d、e、g、j β 侧面；h、k……7 齿的跨距；——14齿的跨距；l……用5/16吋滚柱
——齿根

①齿数；②齿间数；③英寸

周节累积误差的总幅度就依跨距的齿数而定。这样的结果对于从第51到第71齿的跨距就更加显著。对于用齿间中心线量规测量所得的曲线k,也可以应用同一的评语。最后,曲线l表示出由架在连接齿间上的直径5/16吋滚柱的径向变化所决定的,节圆对分度工作台旋转轴线的同心性,以及根圆柱的同心性。这两个曲线之间的接近一致表明,当用径向基面进行侧面周节测量时,根圆柱有显著的优点。据说,对于滚削与剃削齿轮,详细的检查像B.S.1.807所规定的斜齿周节误差不一定是生产检查的最好方法,因为上面所提到的测量困难可以导致错误的结果。另一个解决的办法是在切削一个试验性直齿时,定期检查滚齿机工作台的分度精度,直接控制固定在工作台上的每一个斜齿轮坯的安装精度,从而保证轮坯轴颈与工作台轴线同心。试验表明,测量每一个斜齿轮的周节误差,如Davis所指出,意义很小,测量结果主要取决于所用的测量程序。关于最大累积误差,以及相邻周节误差,英国现今已能够满足B.S.1498的要求。很多试验的结果说明,短跨距误差的精密检查,尚是一个严重的问题。

齿向或螺旋角

在船用齒輪上，齒向通常是間接地用軸向周節或螺旋角的測量控制的。作者的意見是，獲得真正成就作一般檢查用的儀器只有實驗室設計的軸向周節儀。採用這種儀器要獲得可靠的結果，雖然需要高度的熟練技術，但是對於齒輪加工機床的製造及使用工廠來說，已經證明這是非常寶貴的。儀器結構輕便，它與齒輪直徑無關，其測量精度在6吋寬度上達到0.0001到0.0002吋（假使齒面光潔度滿意的話，就可獲得這樣的精度）。Joughin 的論文也提到了這一點，他着重指出，為了使螺旋角限于適當的精度範圍內，必須改善表面光潔度。不同於這種類型的其他儀器，它不需要外部的定位面。測量通常在平面上進行，因此，備有便利的安裝夾具。

近年來，發明了一種直接測量螺旋角的儀器。如 Sawyer 所說明的，它由兩個主要部分所組成：安置在被試驗齒輪齒面上的一個鑄鐵刃邊及裝有刻度盤的裝置，刻度盤裝在一端置于測量砧的軸上。使測量砧與齒面相接觸，用光學的測微計從刻度盤上讀出齒的螺旋角。這一儀器可以應用於12吋以上的任何直徑的齒輪。如前面所指出的，儀器安置在齒輪的端面，只有當齒輪軸置于豎直面時，才能進行測量，這對於很多過程是一個不便。測量的總精度有賴於安置端面的平直性，儀器讀數精度據製造廠家稱約為 ± 2 弧秒。

上述儀器的任何一種，作為最後檢查都不能認為完全滿意，實有必要不斷改進技術。為了滿足這一需要，在 Admiralty-vickers Gearing Research Association 領導下設計並且制成了一種儀器，作為齒向測量的基礎標準。這一儀器的測量頭可以測量直徑20吋，寬70吋的齒輪。儀器的原理是，沿着儀器床身移動的測量滑板的運動，通過一個正弦杆架和鋼帶機構與主軸的旋轉運動嚴格對應，主軸與被測小齒輪連結。以齒輪旋轉軸頸為準進行測量，螺旋綫與理論上的偏差，是自動記錄下來的，如圖26所示，精度在0.0001吋以內。這一儀器在決定齒輪輪齒不平度的真實波幅方面已經滿足了最有效用的目的，對於齒向測量的總精度的同樣檢查即將實現。一個性能與上一儀器相近的儀器在 Zrodowski 與 Moncrieff 論文中已經作了簡略的敘述。

齒形

用最理想的測量條件，輪齒齒形與名義漸開綫齒形的偏差絕對精度不大於0.0001吋。這樣高的精度只限于直齒輪與斜齒輪，因為這種齒輪可以架在儀器的頂尖間。這種儀器採納了最精確的展成漸開綫的方法與靈敏的記錄系統。在檢查船用齒輪齒形時，雖然也需要同樣的精度，但是用現有的輕便儀器，尚不是易于獲得的。

所以需要對齒形進行精度檢查，一方面是由於船用齒輪滾削後加工過程的發展所引起，另一方面也由於需要適當的生產控制方法。滾削一個正確的齒形的困難，很多的研究人員已經提過，其中 Couling 說，從實際應用來考慮，儘管採用精密剃削 (Davis) 可以進一步改進齒形精度，但誤差一般不會降低到0.0002到0.0003吋。

在英國國家物理實驗室 (Tomlyson and Timms) 曾經發展了各種輕便縮放儀，在這裏面，齒形原大記錄在炭黑玻璃板上，經光學放大50倍的齒形，與放到同樣尺寸的名義齒形圖在投影屏板上作比較。這種測量方法的總精度據估計在0.0002吋範圍內。

Dudley 發展了另一類型的儀器，它從直綫上記錄下偏差而不是象用普通的漸開綫檢驗儀從真正的漸開綫上記錄下來。在法向平面上用一個指示器移過齒面，在節綫上沿齒形切綫

移动。当然，选择法向平面来测量的一个理由，因为在这一平面上，齿形曲率较小。这个仪器属于半轻便的，需要一个尺寸较大的检查架子来安装被检查齿轮。

在机械工程研究实验室发展了一种采用这一测量原理的仪器，它可以直接应用到被检齿轮上。置于仪器主体上的三个支承脚放置在适当的齿间中，并调整到可以在端面上进行测量。记录装置置于一个直线滑板上，它对包括三个支承脚中心的平面的横动方向，由仪器中的正弦杆预先定好。在使用的时候，在炭黑的玻璃板上记录下来相对直基准线放大十倍的齿形曲率。以后将这个记录用光学再行投影放大，与名义的齿形作比较。在与齿面垂直的方向，整个放大到500倍，对齿侧的同样部分进行相似的记录，复制误差度估计在0.0001吋以内，测量的总精度估计约在0.0002吋。

美国还发明了另一种结构的轻便测量仪，这种仪器以后在英国投入制造。用这个仪器，以齿轮的外径作基准，在一系列预定的垂直与水平位置上，采取选择的测量，确定了齿廓的形式。这些测量是用测微计控制的横滑板与垂直滑板所得出的，每一个滑板可以预先安置在任何需要的位置上，其调整精度在0.0001吋之内。垂直滑板装有一个由灵敏指示表组成的基准指示器，灵敏指示表记录下与齿面接触的球状触头的运动。如要得到齿形误差形式的详细图，需要相当数量的单项测量。这一点在图4的曲线中有很好的说明。在图4中，曲线A是用标准式渐开线检验仪测得的，曲线B是由用 Vinco 仪（座标仪）测得的读数确定的记录。

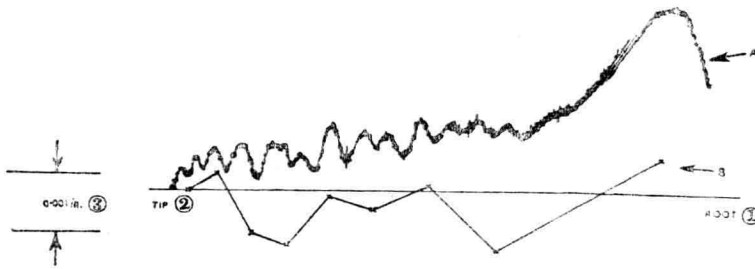


图4 齿形误差的记录
A-由一个标准式的渐开线检验仪得出、B-由美国式机器读数得出
①齿顶；②齿底

机床工作台运动的周期误差

对于滚齿机工作台运动周期误差的测量，是由 Tomlinson 首先提出的。他发明了通过在炭黑玻璃板上记上精细轨迹的方法，记录这一误差。约在同一时间，Merritt 也发明了同样的技术，任何两个连接的机构，例如机床工作台与蜗轮付元件均匀性的程度都可以用电磁操作的触头在装于机床工作台上的赛璐璐带上记录下来。Timms、King 与 Jeans 所作的论文叙述了在1939—45战争期间发生的最新炭黑玻璃板技术的发展。Merritt 记录系统在操作方面简易，方便。测量的记录，包括随后的结果分析，是一个冗长的过程。但是这一测量方法已在英国为机床制造厂，以及船用工业所广泛采用，其中包括很多海外厂家。由于广泛使用的结果，自从1940年以来，蜗杆与滚刀轴周期误差的波幅已大为降低。结果一些英国机床制造厂现今对于这些元件在获得 B.S.1498 : 1954 所规定 A 级的公差方面困难很少。Timms 发展了另一种测量系统、用摩擦驱动的办法使机床工作台运动与滚刀心轴的旋转联结起来，在这些元件之间，相对运动的任何变化都加以电动放大，自动地记录在图纸上。这

样获得的結果，为工作台传动精度提供了直接指标，对机器的任何調整的效果，能够很容易看出。采納了同样基本技术的商品，在德国已可买到，人們称之为 EWM 型周期誤差电子测量仪，以测工作台运动相对滚刀心軸运动的平稳性，来决定滚齿机的精度。最新的发展只限于比較小直径的机床，对于工作台直径15呎的机床的适宜装备，尚未見有公布的情报。

作者的意見以为，上述的测量方法没有一个可以完全滿意地解决这个問題。对机床工作台运动应用波紋带技术到周期誤差的测量，对圆周繞射粗光栅的研究工作正在机械工程研究實驗室进行。

滚刀刀架运动中的周期与累积誤差

直到今天，对滚齿机的滚刀刀架运动的周期与累积誤差，还没有一个确定的直接测量方法。在現時，对滚刀刀架运动累积誤差的测量，是以控制进給絲杠的精度（包括机床立柱的对准），以及对被检斜齿輪的軸向周节做全面的测量，間接确定的。这种过程不能像在 B.S. 1498 的 19a 条所規定的，对刀架运动的精度提供直接的控制。在普通工厂条件下，主要困难在于至 3 呎距离的直接测量要保証 0.0002 吋精度。例如在测量过程中，空气温度的微小改变（这是时常会发生的），对于所获得結果的精度都会有相当的影响。Timms 指出，只記錄相对于已知精度的标准长度的运动誤差可以显著的減低这种测量的不平稳性。标准长度安置在被检机床上。如在論文中所叙述，标准长度是一个精确分度的玻璃直尺，用一个簡單結構的照像机，在直尺刻度的間隔与刀架运动之間作直接比較。这一技术成功地应用到加工船用齧輪的滚齿机上，但还未被制造部門采用。

关于刀架运动周期誤差的测量，很多年来黑板的技术在应用上是十分成功的。但是这个过程非常緩慢，吃力，不适于現今的要求。人們建議，应当应用波紋带技术，它可成功的解决这一問題（Timms 和 Aitchison）。这时，牽涉到直綫与圓繞射光栅的适当結合。这个测量过程在机械工程研究實驗室已經成功地应用到10呎长的，由标准絲杠校正的車床的拖板运动中的誤差测量。

最近所获得的結果說明，对于粗光栅可能記錄到 0.0001 吋的偏差，在机械工程研究實驗室对于应用到齿輪与机床問題上，发展的不够积极。

机床立柱对准

滚刀刀架的运动相对机床工作台旋轉軸綫的平行度的普通测量方法，是用一个精确研磨的与工作台軸成同心安装的試驗台。测量在两个面上分別进行，一个与滚刀心軸移动面平行，一个与之垂直。对于每一个平面，均在延伸托架上安置两个隔开 180 度的指示表。当机床刀架移动的时候，延伸托架就附在滚刀刀架上。沿着試驗台大約在 6 时間隔記下讀数。在將試驗台旋轉 180 度之后，再重复测量，获得每一位置上的平均讀数。由于延伸托架的易弯性（它长可达 6 吋），这个测量的方法在大机床就产生了困难。为了避免测量中的这种不可靠性、机械工程研究實驗室曾經发明了一种光电测量装置。从伸出在机床立柱頂上的支撑随意地挂上一根金属綫，下端載上重量，形成一个垂直准绳。滚刀刀架运动与这个垂直准绳的偏差用光电测量装置加以测量，电子装置不与准绳金属綫接触。在测量过程中，可以利用正弦棒机构調整测量装置相对作为直綫准绳的金属綫的位置，这样就可以补偿工作台軸与垂直綫任何大的偏差。机床工作台軸对作为垂直准绳的金属綫的相对位置，由一个灵敏的酒精水准仪而定，然后将工作台軸的傾斜与刀架运动的記錄图样对应起来。

未来的发展

检查大型齿輪輪齿要素的測量仪，通常是直接記錄式的，誤差是由某些类型的指示表指示的。为了減少操作的劳累，以及改进測量的总的精度，用图表記錄系統实现測量机械化，是极为需要的。在很多应用上，例如齿輪波紋度与齿形的測量，一个結構紧凑的电气記錄装置似乎是最吸引人的。由于它能得到所需要反应的灵敏度与頻率。同样的評語可以应用到周节誤差的測量，虽然在这种情况下，用直接控制机床工作台的分度誤差能有更多的成就。

机械工程研究實驗室正在发展着采納直綫与圓的光栅波紋帶技术的应用，比之既定的測量系統有相当的优点。这个技术已扩大到动态度量衡学的范围，便利了对于齿輪装置，以及机床，包括滾齿机的控制系統的应用。

参 考 文 献

1. Timms C. and Scoles C. A., 1948 Machinist, Vol. 92, p. 1115, "Some Application of the plastic Replica process to Surface Finish Measurement".
2. Sawyer J. W. and McCubbin J. G. 1950 Machinry (USA), vol. 56, №12, [P. 135, "Recording Surface Finish and wear of Gear Teeth".
3. Zehender E. 1952 Z. Ver. dtsh. Ing., vol. 94, P. 450, "An Interference Method of studying the properties to Rough surfaces".
4. Kohaut A. 1954 Feinw Tech., vol. 58, P. 315, "The Microconformation of Artificially-Finished Surfaces and Their Interference patterns".
5. Dyson J. 1955 Engineering, Lond., Vol 179, P. 274, "Examining Machined Surfaces by Interferometry".
6. Hagen W 1955 Z. Ver dtsh. Ing., Vol. 97, P. 849, "The Influence of Material, Gear Cutting Machine and Gear Cutting Tool on the Surface Quality of Gear Tooth Flanks".
7. Timms C. 1947 proc. Instn mech Engrs, Lond., Vol. 157, P. 418, "Measurement of Errors in Turbine Gears".
8. De laval Co. 1957 Shipbuilder, P. 707, "De Laval Instrument for Checking Gear Wheels".
9. Hofler W. 1957 "Electronic Gear Measuring Devices", leaflet No 305 E (Lorenz co., Ettlingen, Germany).
10. Barrell H., 1958 Proc. Instn. prod Engrs, Lond., vol. 37, №1. P. 3, "The Bases of Measurement".
11. Newton J. M. 1949 Proc Instn mech Engrs, Lond, vol 161 P 10, "On the Accuracy of Gear Hobbing Machine tables".
12. Davies J. A. and Semar H. W. 1948 Soc. Nav. Archit. N. Y., P. 10, "Mechanical Reduction Gears".
13. Davis A. W. 1956 proc Instn mech Engrs, Lond, Vol 170, P. 477, "Marine Reduction Gearing".
14. Joughin J. H. 1951 Proc. Instn mech Engrs, Lond., Vol. 164, P. 157, "Naval Gearing—War Experience and present Development".
15. Sawyer J. W. 1952 F. Amer Soc, nav Engrs, P. 719, "Gear Measuring Equipment Used by the Bureau of ships—U.S. Navy".
16. Timms C. 1958 Trans. Instn Engrs shipb, scot., Paper № 1238, P. 335, "Work of the Mechanisms, Engineering, Metrology and Noise Control Division".
17. Zrodowski J. J. and Moncrieff A. D. F. 1953 soc. nav. Archit mar Engrs, "Advanced Precision shaving Techniques Applied to Highspeed Marine Gears".
18. Couling S. A. 1949 Engineer, Lond, P. 580, "Helical Gears Cut on solid Table Machines—№11

Distribution and Amount of Errors” .

19. Tomlinson G.A. 1938 Machinery, 20 th January, “A Precision photograph for profile Measurement” .
20. Dudley D.W. 1949 Machinery, October, Involute Checking Machine for Large Helical Gears “ .
21. Timms C. 1955 “Engineering Dimensional Metrology” .P.349 (H.M. stationery office, London) .
22. David Brown Co. 1956 Metalwkg prod, P.1409, “Portable Gear profile Measurer” .
23. Tomlinson G.A. 1929 F.Sci Instrum, vol 6, № 5, “A method of Measuring the periodic Error of a Mechanism” .
24. Merritt H.E. 1934 Trans Instn mar Engrs, vol 46, part 12 “Gears for Marine Main and Auxiliary Drives” .
25. Timms C, King A.A. and Jeans L.E. 1943 Engineering, Lond., Vol 166, P.337, “The Measurement of periodic Errors in Gear Hobbing Machines” ,
26. Timms C 1950 Engineering, Lond, vol 169, P, 307 “Autographic Recording of Errors in Gear Hobbing Machine Tables” .
27. Timms C and Aitchison T. W. patent Application, № 17604/58, “Application of Circular and/or Linear Gratings to the Measurement of Errors in the Motion of Mechanisms Including Machine Tool Elements” .
28. Timms C 1949 Engineering Lond.. vol.168. P 679. “Measurement of progressive pitch Errors in Machine tools Using High-speed photography” .
29. Timms C and Aitchison T.W. 1958 Metalwkg prod., vol 102, №29, P 1262, “Machine Tool Alignment Recorder” .

(刘文譯自«Power Transmission»1959, 28, №325, 98-105, 孙明鑑校)

透平齒輪周期誤差的測量

(苏联) И. Ю. Тулецкий

齒輪的運動誤差，是該齒輪在同理想齒輪嚙合時的瞬時迴轉角的實際值和公稱值之間的差值。

所謂周期誤差應理解為在齒輪旋轉一周的過程中按一定頻率周期地多次重複出現的一切誤差。周期誤差影響到齒輪工作的平穩性和齒輪傳動的噪音。

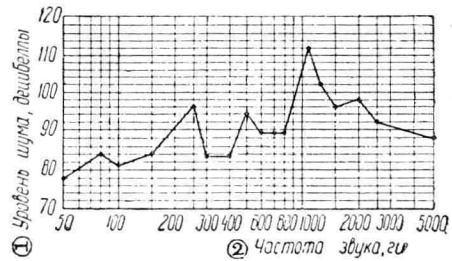
全部的運動誤差主要是由於滾齒機分度蝸輪的累積誤差引起的。而被切齒輪的周期誤差是與滾齒機分度機構的蝸桿精度，或者其他因素（例如在試驗台試運轉）有關。

周期誤差的影響如圖 1 所示。圖示曲線是一個透平減速齒輪噪音的頻率分析結果。

從圖 1 可以看出噪音強度的最高峯是發生在頻率接近於 1100 赫芝的時候。在這個頻率下發生這樣的峯值應認為是由於齒輪周期誤差引起的。

增高了的噪音和振動可以在峯值的頻率分析過程中發現峯值頻率或與實際周期誤差的頻率相同，或者為實際周期誤差的頻率的倍數。

例如，在圖 1 上的峯值相當於 1100 赫芝的頻率。這個頻率或與主動齒輪每秒钟的轉數和在齒輪上發現的實際周期誤差頻率的乘積相同，或者為它的倍數。在這種情況下周期誤差的頻率為 12，而主動齒輪的轉數約為 90 轉/秒。



① 噪音強度 (分貝) ② 聲頻 (赫芝)

圖 1 透平減速齒輪的噪音頻率分析

圖 2 所示為齒輪每轉一周具有 K 次誤差的斜齒輪的簡圖。由於齒輪有周期誤差，於是輪齒有波紋度，以及由於所有的波紋頂點都位於同齒輪軸綫相平行的母綫上，所以相嚙合的齒輪將沿着這些波紋的頂點嚙合，從而使斜齒輪的嚙合效應將與直齒輪的嚙合相同，也就是說雖然沿軸向有重疊作用，但是斜齒輪工作的平穩性仍將被破壞。

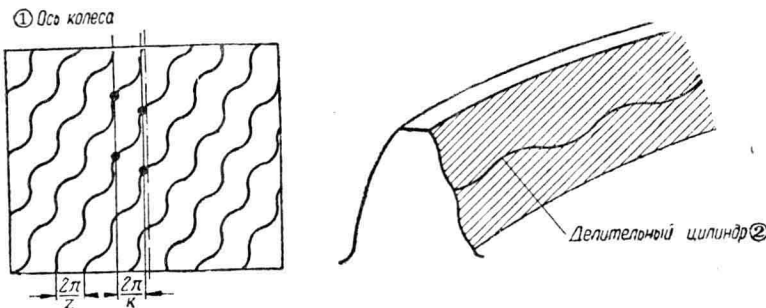


圖 2 有周期誤差的斜齒輪圖

① 齒輪軸綫；② 分度圓柱

應用波度計測量齒輪周期誤差法。採用波度計測量齒輪周期誤差的方法可以消除一些上

述缺点。这种方法基于下列原理。

大家知道，周期误差的特征是：

- 1) 波紋数与滚齿机分度蜗輪的齿数相等；
- 2) 波长是以分度蜗輪一个齿所占有的被切齿輪的分度圓弧的长度来确定的，即

$$L = \frac{\pi d_o}{Z_o}$$

式中 Z_o 是滚齿机分度蜗輪的齿数。

在切制斜齿輪时，周期误差促使齿的螺旋表面形成波紋状。齿側面上的波紋长度为

$$l = \frac{\pi d_o}{Z_o \sin \beta_o}$$

式中 β_o 是分度圓柱上的螺旋角。

我們知道了在哪台机床上进行切齿时，就可以預先算出輪齿螺旋面上的預期波长。

創造波度計的思想概括如下：

既然在齿的側面上具有以波紋状表现的周期误差，那末就可以創造一种测量指示器，它的两个固定脚放在波峯上（如图 3a 所示），而在固定支脚的中間可以安放一个测量触头，这个触头将按照波幅的大小传送本身的相对移动。

不难証实，将这种仪器沿着齿輪移动时，它的固定支脚和测量触头将依次地时而位于波峯上，时而位于波谷內。在这种情况下指示器的示值将等于周期误差的二倍振幅，从而提高了仪器灵敏度。

波度計的定位和用它测量輪齿螺旋面波紋度的示意图如图 35 所示。仪器是以外圓柱面上的 $A.C.D$ 三个点作基准，并以 A_1 和 C_1 两个固定球状支脚靠在齿的側面上，而双臂杠杆式的测量触头 B 则将波紋度的大小传送到刻度为 2 微米的指示器上。

固定支脚可以移动，以便把它調整到波的长度上。固定支脚之間的距离称之为测量基綫。测量基綫必須等于波长 l ，或者为 l 的任何奇数倍。当测量基綫等于 $2l$ ，或偶数倍 Kl 时，无论是固定脚或是测量脚都将同样地沿着波峯或波谷移动，而指示器不能指示出与該频率周期误差相应的误差值（视图 3b），这样一来通过适当的調整，可以消除該频率波紋度对仪器示值的影响。

应用波度計检查周期误差时，須将固定支座調整成給定的基綫距离 l ，調整它的后支脚，以便把它靠在同被检查齿相邻的一个齿的外圓面上。然后将波度計沿着輪齿移动，并记录此时指示器指針的移动。

在测量过程中必須把相应指示器指針极限位置（最大值或最小值）的点标记下来。然后依次地把波度計移到邻近的齿上，把每个齿上极限位置的点也記下来。

在作这种标记的时候，如果发现标记出来的一些点都位于圓柱的一个母綫上，而且与輪軸綫相平行，那么就会得出一个許多相距一个端周节的这样母綫，周节相当于频率等于蜗輪齿数的周期误差的端周节。点沿齿长的分布与波长 l 相符合。現将测量一个齿輪时所作的这种标记例子概略地示于图 4a。

在进行标记点的过程中如果发现所有标记出的点都位于齿輪的一个端截面上，而沿着軸向沒有标记出点来，那末我們认为齿輪螺旋綫具有轉折現象（图 4b）。螺旋綫的轉折乃是齿側螺旋面的螺旋角有規律性的偏差，这种偏差可能是由于銑刀主軸导轨的局部误差，改变机床立柱傾斜的溫度应变，以及其他原因引起的。在某些情况下齧輪出現螺旋綫的轉折現象，

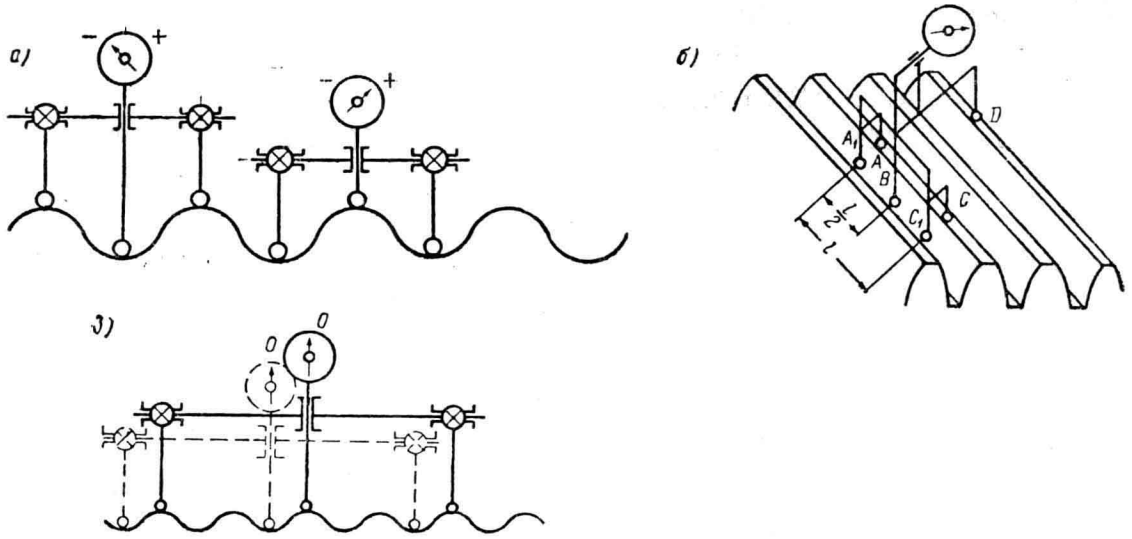


图3 波紋度測量和波度計定位基準圖

a-指示器的示值等于周期誤差的双倍振幅；b-波度計定位基準；B-測量腳之間的距離等于双倍的波長——不能揭示周期誤差

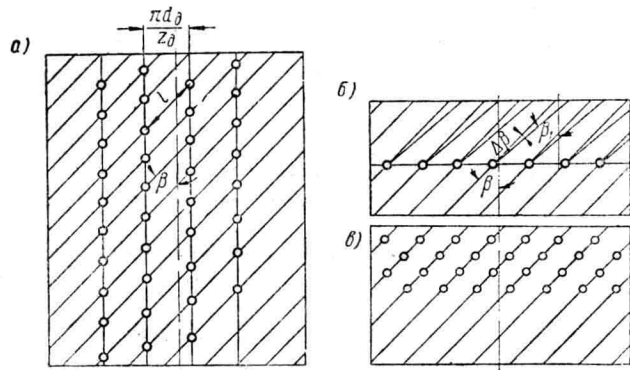


图4 齒輪波紋度的測量標記圖

a-一个齒輪的標記例子；b-齒螺旋綫的轉折現象；B-進給鏈的周期誤差

是由于齟輪同具有螺旋綫轉折（由于切齒的結果）的齒輪进行研齒而引起的。

如果在標記波度計位置的过程中得出有系統的一列点，而每一列点都位于齒輪端面上，那末就会有絲杠誤差占据主要成分的進給鏈的誤差（图4B）。

波度計的灵敏度非常高，能够按照指示器的示值測出2微米以下的周期誤差，也就是說可以发现等于2微米周期誤差的双倍振幅。

进一步改进的波度計型号是在基洛夫工厂生产的带自动記錄器的波度計（图5）。

波度計的壳体为圓管1，支承与測量腳制成一体的迴轉軸的頂尖，置于圓管中。杠杆的一端是一个圓球，它是可动測量腳，而另一端則直接的作用于带尖針5的小杠杆上。

圓球測量腳的摆动以30：1的比例传送給尖針5。尖針在炭黑玻璃6上移动，并在其上繪出波形曲綫。这一曲綫用放大10倍的投影机进行观察；并可以将曲綫印在照像紙上。

波度計支持在两个球形腳3上，这些腳放在齒槽內。可調整腳④是供波度計按照齒輪外圓柱体进行定位用的补充支座。

波度計是这样来調整定位的，即将两个固定腳3和可动腳2靠在同一齒面上。在波度計

沿齿螺旋面移动时，橡皮滚子便沿着齿輪外表面滚动(在图 5 上表示出来)。滚子的旋轉运动通过齿輪系統变为鑲有炭黑玻璃的框架的往复直綫移动。前进移动的比例为 1 : 10，通过这样的比例使我們能够在长度短的炭黑玻璃上紧密地繪出縮小 90% 的齿面波紋度的长度曲綫。

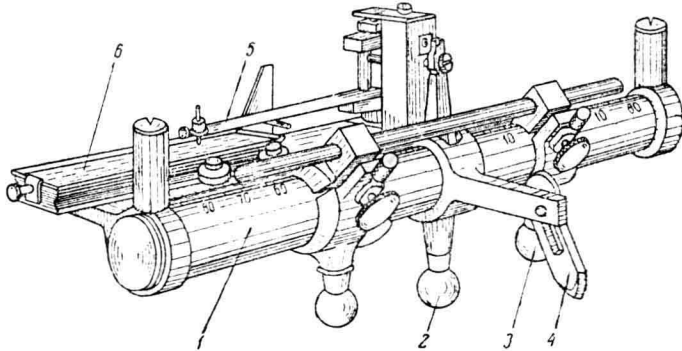


图 5 基洛夫工厂生产的带自动记录器的波度計

这样一来，每个被检齿輪便拥有照片形式的波长实际记录表。利用放大机可把玻璃板上繪出来的记录表放大到所需要的尺寸，并把它印在照像紙上。

可以利用刻度尺沿管 1 把波度計的脚調整到給定的定位距离。此时两个固定脚可以同时移动，以便調整它們相对测量脚的位置。利用波度計测量精密齿輪的結果表明，这种齿輪的周期誤差平均为 2 ~ 8 微米，相当于圓柱齿輪公差 ГСОТ 1643-56 中所規定的 5 級精度。

利用波度計记录周期誤差的結果示于图 6。测量是在粗切齿以后的齿輪上进行的(图 6a)。从显影记录上可以看出，齿輪是具有周期誤差——波紋度，以及表征齿面光洁度的微观波峯。显影记录的比例为 200 : 1。利用波度計对表面光洁度等級做出的记录实质上也是一种近似的。图 6б 曲綫所示的齿輪，其齿輪实际上沒有在这种记录的比例下发现的这样的周期誤差和表面不平度。

图 6б 所示是齿輪周期誤差的照像记录部分，而图 6г 所示是周期誤差在輪齿上的实际分布情况。

从图 6д 上可以看出全部周期誤差是沿着齿輪軸向截面分布的。在图 6г 标出了齿的长度尺寸(200 毫米)和距齿輪端面的极限段 30 毫米。若将测量脚置于 $3l = 54$ 毫米的基綫上，利用波度計不能对极限段进行检查。

建立大型高精度齿輪嚙合要素的合理检查系統。从上述我們可以得出結論，即現在有的，以周节测量为基础的大型齿輪运动誤差检查系統是不完善的。

当然，可以沿着改进周节测量的途径来发明和制造新型测量仪。这种新型测量仪可以测量齿輪的运动誤差，而与测量的主观錯誤无观，但是这条道路是很长的，而且即便設計出完善的周节检查仪，周节测量的劳动量将仍然是巨大的。

最有效的检查系統，是考虑采用波度計和检查滚齿机的运动精度。

建立简单测量系統的基本条件是詳細研究滚齿机运动誤差和在其上加工的齿輪精度等級之間的关系，以及滚刀和被加工工件精度之間的关系。此外还須注意滚刀和齿輪安装对齿輪精度的影响。

这种检查系統的原始規定如下：因为滚齿机誤差对齿輪誤差的产生起有很重大作用，所以应该严格規定，只有在滚齿机誤差不超过規定限度的情况下，才能加工特別精密的齿輪。

表 1 介紹的是滾齒機的容許誤差，在這些滾齒機上可以加工齒輪公差 ГОСТ 1643-56 中所規定的 4 級和 5 級精度的齒輪。

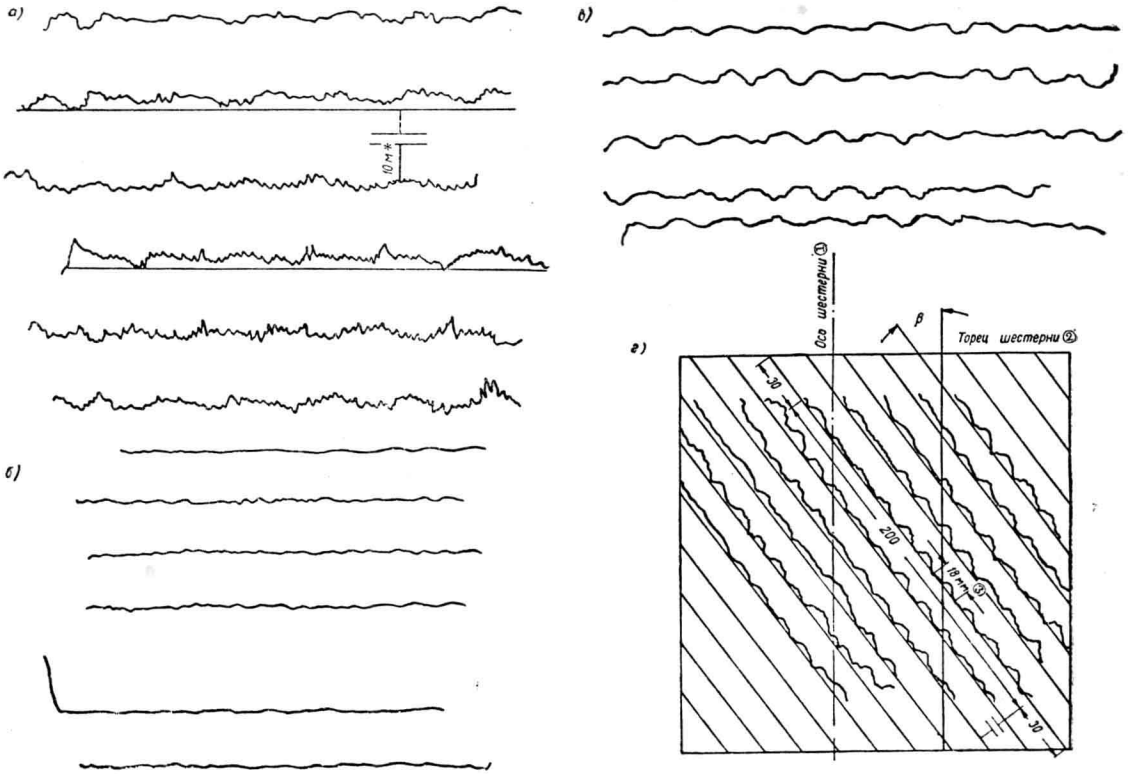


图 6 利用帶自動記錄器的渡度計測出的齒波紋度照像記錄

a-粗切齒的測量結果；б-實際在齒輪上沒有周期誤差；в-周期誤差的照像記錄部分；г-周期誤差在齒輪上分布的情況

①齒輪軸綫；②齒輪端面

精密滾齒機的容許誤差

表 1

檢 查 項 目	精 度 等 級	被 切 齒 輪 直 徑 (毫 米)					
		320—500	500—800	800—1250	1250 2000	2000 3150	3150 5000
		秒 (角度)					
極限運動誤差	4	11	9	8	6	5	4
	5	20	16	13	10	8	6
極限周期誤差	4	3	2	1.5	1	0.5	0.4
	5	6	4	2.5	2	1.5	1

為了查明在滾齒機上是否可以加工精密齒輪，須按照滾齒機專用檢查規程定期檢查滾齒機的运动精度。因此滾齒機运动鏈的精度特性應成為記入齒輪切齒登記卡的首要項目。需要記入切齒登記卡的其次項目是一些關於滾齒機幾何精度的部分檢查數據。至於制件在機床上安裝的檢查數據是需要記入登記卡的第三項。這些數據必須在制件的粗切工序以前和精切工序以後確定下來。