

提高齿轮加工精度的方法



〔苏联〕Б·А·塔依兹主編

吳大觀等譯

中国工业出版社出版

提高齿轮加工精度的方法

【苏联】B·A·塔依兹 主編

吳大觀 王立名
戴志舒 楊 墉 黎建畿 譯

中国工业出版社

本书是在莫斯科齒輪制造工艺會議上所發表的論文集。主要是介紹各種齒輪的精度檢驗和高精度齒輪加工中的問題。其中包括：怎樣檢驗齒輪制造精度，分析噪音發生的原因來檢驗齒輪質量，測量齒輪的新方法和所用的儀表等，剃齒和磨齒時產生誤差的原因及其改進的措施。

本論文集雖是蘇聯五十年代有關檢驗齒輪方面的經驗，對當時蘇聯齒輪精度的提高起了很大的作用。對目前我国精密齒輪制造頗有參考的價值。

本書對機械制造廠的技術人員、高等工業學校的教師和學生以及科學研究人員均有參考價值。

Б. А. Тайн

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Машгиз, 1954

* * *

提高齒輪加工精度的方法

吳大觀 王立名 黎建銳 譯
戴志舒 楊 壩

*

機械工業圖書編輯部編輯（北京蘇州胡同 141 號）

中國工業出版社出版（北京佟麟閣路 10 號）

（北京市書刊出版事業許可證出字第 110 號）

機械工業出版社印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行·各地新華書店經售

*

開本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 $7 \frac{3}{16}$ · 字數 188,000

1964 年 4 月北京第一版 · 1964 年 4 月北京第一次印刷

印數 0,001—6,170 · 定價（科七）1.20 元

*

統一書號：15165 · 1674（一機-339）

前 言

不断提高机器的工作速度和增大现代联动机的功率，已引起要求提高制造精度的必要。齿轮传动非常广泛地应用在机器、机床和仪表上。齿轮传动不但用于功率大、速度高、工作在圆周速度 $90 \sim 120$ 米/秒之间的减速器上，也用于低速的计算机上和齿轮直径为 $3 \sim 4$ 米传动角度误差不超过 $5 \sim 10$ 秒的精密分度传动机构上。

对齿轮传动要求的提高，促使齿轮质量的检验方法得到改进和更加完善。首先，发展的方向是创立一些能够检验传动的使用精度和能够评定传动精度是否能与机械之用途相符的设备。由于必须提高测量精度，减少检验工序的劳动量，要求制造出特殊传动形式的检验设备及实现齿轮检验工序机械化的任务，这都促使改进齿轮检验方法和测量仪器。

Б. А. 塔依兹、М. Д. 金欽、М. А. 雷諾夫、Н. Ф. 古洛夫及 В. К. 格林凱維奇提出了有关这些问题的论文。在这些论文中研究了以直接测定齿轮运动精度的方式综合检验齿轮精度的新方法，在分析测量结果的基础上确定齿轮误差根源的方法，齿轮传动中发生噪音的原因及其测量方法，及齿轮在载荷状态下试验，这都能确定出制造误差对动力特性的影响的方法。在 С. Н. 卡拉西尼科夫论文中介绍了汽车工厂中伞齿轮的检验方法。

在所有这些论文中除了分析研究合理地检验齿轮的原则性问题以外，还给出了苏联所制造的最新测量仪器的参考数据。

在齿轮和齿轮传动机构的检验方法及检验工具获得的同时，齿轮加工的精度也大大地提高了。在这方面对齿轮各科加工工序进行了精密的研究，其目的在于发现提高精度的潜力和确定提高齿轮使用质量的途径。

在 В. Н. 索柯洛夫及 В. И. 柯尔金欽的论文中，分析了在不同

的齒輪精整工序中——剃齒和磨削圓柱齒輪與傘齒輪中其誤差產生的原因及提高這些加工工序精度的方法。論文中在理論和實驗資料數據的基礎上，推薦了制齒工序基本參數的選擇方法，並提出提高磨齒工序精度的建議。

本論文集是蘇聯機械工業出版社和全蘇機械制造科學工程技術學會莫斯科分會的齒輪切削加工學部為了即將在莫斯科舉行的齒輪制造工艺會議而共同準備的。

在論文集中刊載的材料，未能反映出蘇聯工程師們在齒輪精度和檢驗問題方面近期所完成的所有的。本書所選擇刊載的論文，着重介紹有關僅發表在提高輪齒精加工工序精度方面及在改進各科齒輪的檢驗方法和檢驗工具方面所進行的主要工作。齒輪檢驗方法的進一步發展的任務，應該由會議擬定。

齒輪制造工艺會議組織委員會主席

技術科學博士 B. A. 格夫利林柯

全蘇機械制造科學工程技術學會莫斯科分會

齒輪切削加工學部主席

技術科學副博士 M. Д. 金欽

蘇聯機械工業出版社金屬加工及機床制造

論文主任編輯

工程師 P. Д. 倍西力曼

論文集編輯

技術科學副博士 副教授 B. A. 塔依茲

目 次

前 言

檢驗齒輪制造精度的基本原理	塔依茲(1)
根据噪音来鉴定齒輪制造质量	金 欽(25)
傘齒輪制造的檢驗工作	卡拉西尼科夫(80)
齒輪測量的新方法	古洛夫等(129)
圓柱齒輪剝削效率的提高	索柯洛夫(159)
圓柱齒輪磨削的发展	柯尔金欽(192)

檢驗齒輪制造精度的基本原理

技术科学副博士、副教授 B. A. 塔依茲

在减少机构和设备的重量及其輪廓尺寸的同时，不断提高机构的工作速度和增大设备的动力，是现代机器制造业的特点。速度与載荷的增加促使有必要急剧的来提高机器部件和零件的制造精度。

在各种不同类型的机器中，采用动力为几万千瓦，圓周轉速达 120 米/秒的齒輪傳动已是十分广泛。

实际遇到的直齿圓柱齒輪傳动的速度达到 50 米/秒。

除此之外，在金屬切削机床和計算-运算等机构的运动鏈中日益广泛的精确的分度傳动。在现代的精密机构中，低速傳动鏈終环轉角对其准确的相互位置偏离量不应超过几秒。

在这样的使用情况下，制造与檢驗各种类型齒輪精度的問題具有特殊意义。

在檢驗齒輪时应保証有高的檢查精度，由于檢驗工序极为繁杂，因而需要大量熟练的檢驗人員；同时，复杂的度量仪器，在檢驗时要花費很多的时间。檢驗具有嚙合表面几何形状复杂的机件，使用指标的必要性将决定着檢驗工序的劳动量。齒輪制造精度的檢驗与机械制造业中其他許多零件的檢驗区别是：要求同时检查它的尺寸、形状、表面光洁度及它們的相互位置。

齒輪制造精度由下列几个指标来評定：

齒輪將轉动运动傳給其相配齒輪时的运动精度及平稳性；

应保証輪齿側表面的貼合在給定範圍內；

非工作面間的側隙值和其值的不变性；

輪齿側表面的光洁度；

伴随齿輪工作过程中的噪音現象（用于高速傳动）。

在各种不同的情况下应用齿輪傳动时，这些指标中的每一项具有不同的意义。

用于讀数的、仪器上的、不反轉的傳动或者在正反行程中仅有单面齿形工作的傳动上（在有动力閉合时，例如用彈簧），齿輪每轉的运动誤差，即按轉角計算齿輪位置誤差的数值与其变化特性具有决定意义。側隙、輪齿表面的貼合性和噪音現象在这种情况下沒有实际意义。

在可逆轉的讀数和分度傳动中，主要意义不仅是齿輪在局部的和每轉的运动精度，而且还有决定机构游隙大小，也就是决定各运动环协调程度的側隙值。

用于非高速动力傳动，基本要求是沿齿长方向有良好的貼合，这时运动精度尤其是側隙的大小失去头等的重要性。

用于高速动力傳动时，决定傳动工作质量最重要的因素是决定着傳动力特性和工作噪音指标的运动精度（特别是小角度轉动时的运动精度）和輪齿表面的貼合性。大角度轉动的傳动运动誤差和側隙的大小不是重要的因素。

齿輪檢驗的方式

在选择檢驗齿輪的方法和設備时，在制訂全部切齿生产的檢驗系統时，必須根据齿輪傳动的用途和对它的精度要求出发；另外是根据具体的生产情况（生产的成批性，所制齿輪的輪廓尺寸采用的齿輪加工工艺过程）。

同样重要的是要注意到齿輪檢驗的不同目的以选定檢驗的对象和測量基准等。

齿輪的檢驗分两种：最終檢驗和工艺檢驗。

最終檢驗的目的是判定产品的精度是否和根据用途而确定的要求相符合。最終檢驗所測量結果，應該能說明以上所指出的齿輪精度的使用指标：傳动的运动精度，工作的平稳度，輪齿表面的貼合度及側隙值。

最終檢驗可以採用直接檢驗產品的方法，或者用間接方法對齒輪加工時所用的生產設備進行預防性的檢查。

直接檢驗產品的最終檢驗應該是綜合性的，在產品的測量基準和安裝基準相合時採用。綜合性的意思是檢驗產品精度的三個指標（運動精度，貼合與間隙或裝合性），其中齒輪和測量儀器相接觸的情況應與在使用中的聯接情況是同樣的。這樣，在綜合檢驗時應該得出的不是某些誤差的任意綜合，而是綜合了這樣一些誤差，這些誤差影響着表明產品使用精度的一定指標。

產品的精度的技術要求可以不用直接檢驗齒輪的方法而得到保證。在這種情況下對齒輪加工機床的幾何精度和運動精度以及其調整時的檢驗，對加工齒輪的刀具型面的精度以及它在機床上的安裝時的檢驗，還要對切齒前後毛坯基準面在齒輪加工機床上裝置的精度進行檢驗。這是由於在現代的齒輪加工方法中極大多數都是切削工具对被加工的齒胚相對滾切的某些運動過程。

在輪齒形成的整個運動過程中的誤差包括工具的誤差，將引起被加工齒輪的形狀和尺寸的不正確。當以後齒輪作為機器中的元件工作時，齒輪的這個不正確的形狀和尺寸又引起運動的不均勻性，隨後發生的動載荷，又造成輪齒側面上載荷分布的不均勻。

像這樣檢查輪齒表面形成過程中的一切基素，就可以保證必需的產品精度，而不必直接測量齒輪本身。在渦輪減速器製造業中，主要是採取這類的間接方法檢驗齒輪。在生產渦輪減速器的齒輪時，非常仔細的檢驗銑齒機床、工具，並校正齒輪的工作軸頸，以保證所有一切基素都有高度的精度（例如，銑刀的齒形和齒距誤差為 5~8 微米，直徑為 3000~3500 毫米齒輪的軸頸，其振擺在 30~40 微米以下）。对被製造的齒輪直接進行檢驗的僅是原始齒形的偏移和圓周齒距的均勻度^[3]。對於小尺寸的齒輪絕大部分採用直接測量方法，這時採用間接檢驗方法不是為了確定質量，而僅僅是預防廢品。

由於實際上不可能製造出相對測量誤差非常小的儀器（在几

米直徑时为千分之几毫米),因而大型齒輪采用直接檢驗方法是有困难的。此外,長時間的齒輪加工允許車間的檢驗設備在机床上來檢驗輪坯、工具等的安裝。

中等直徑齒輪的机动工时少,而生产的齒輪質量高,这使檢驗部門的工作人員要承担直接檢驗成品的任务。同时,常常采用緊密嚙合的双面滾動檢驗方法,并配合对切齒机床与工具的預防檢驗。

对最重要的中小尺寸的傳动机构必須直接檢驗齒輪的使用精度。

除以上所指出的齒輪要作直接或間接的最終檢驗外,还有担负另外目的的第二种檢驗形式,即工艺檢驗。

工艺檢驗的目的是查明工艺过程中的誤差,并按照測量齒輪的結果調整工艺过程。例如,用滾動法磨削齒輪时,檢查齒輪的基圓齒距或齒形来确定对砂輪的修整角度或安裝角度作必要的修正。

为了查明每一个工艺因素的单独影响,当进行工艺檢驗时必须使檢查基准与工艺基准相合,而不是像在最后檢驗时所选取的与装配基准相合。如果工艺檢驗的目的在于查明砂輪安裝角度的正确性,那么在檢驗齒輪时就应该消除徑向振摆的影响。在对机床分度誤差进行工艺檢查时以及其他許多情况也是一样。

齒輪的最終直接檢驗

当測定齒輪的檢驗質量是在被測对象不动或以极低的速度轉动,而且在被檢驗的齒輪的輪齒上載荷很小的情况下进行的,这时若仅考虑齒輪的运动条件时,則齒輪精度的指标应当是:

1) 被动齒輪的轉动誤差,它是在被动齒輪与連續轉动的精确的主动齒輪单面嚙合的情况下測定的。測出的偏差称为綜合单面齒形誤差或运动誤差;

2) 被測量的齒輪与不断轉动的精确齒輪(或齒条)在名义中心距离下嚙合时,不工作輪齒型面之間的側隙值;

3) 在名义的相互位置时 (指中心距离和两軸綫的平行度) 精确的主动齿輪与被測量齿輪不断嚙合时在齿側面上实际貼合面的大小。

最終檢驗必須偏重于綜合檢驗法, 因为这种方法能发现所檢量零件的实际綜合誤差, 从而提高檢驗的质量和减少齿輪报废的可能性。

后者和齿輪精度的三个指标之一的一些基素誤差总和的規定公差有关, 因为組成总誤差的 (齿距、齿形、振摆等) 个别誤差靠很小的其他因素的作用可以达到很大的数值。

綜合檢驗法的质量高于分別檢驗法的原因, 也是由于在用綜合檢驗法时齿輪不断轉动, 因而能表现出齿圈在一切阶段嚙合时的精度。

除了測量方法的精度指标之外, 特別有重大意义的是: 由測量齿輪精度的一切运动特性所必需的时间而决定的檢驗的生产率。在这方面綜合檢驗法具有不可比拟的最高生产率, 因为在綜合檢驗时所需要的时间比消耗在分別測量在綜合法中被測的各个基素所需的时间少得多。此外, 綜合測量方法对开展机械化和自动化方面要更加容易些。

齿輪运动精度的基本測量方法是使它和做为測量元件的精确齿条或齿輪做单面齿形滚动。这种檢驗方法是采取不断地測量齿輪与測量元件嚙合时的轉角誤差。它是在主动元件有相同的偏移情况下来測定測量元件的实际偏移和名义偏移的相差值。

在用綜合的单面齿形滚动法时, 齿輪运动的不准确度实际上是由两个被动系統的轉动的比較来确定的。两个被动系統中的一个齿輪傳动而另一个是由仪器上的机构来保証其具有按已定傳动比的准确 (标准) 傳动 (图 1)。

单面齿形綜合檢驗的測量基准是齿輪的軸孔或是軸上的中心孔 (齿輪与軸同时檢驗时), 这个基准能保証測量基准和工作基准相合。

必須确定分度或讀数齿輪运动时的实际运动規律的偏差, 因

为在齿輪每一轉中的这种偏差是它精度的基本标志。这种偏差对于强力快速傳动中啮合的輪齿在进入与离开时会引起动载荷，而且在使用时会产生噪音及振动。

为了使被檢驗齿輪与測量齿輪之間的接触情况接近于在使用中的情况，可将測量齿輪的名义几何参数做成和被檢驗齿輪在工作时相啮合的成对齿輪同样，并在傳动的名义中心距下进行檢驗。这样做在非大量生产时是有困难的，因为增加了測量齿輪的需要数量，也可能加大了仪器的尺寸等。

如果檢驗时保証齿輪的啮合在它使用的（在工艺檢驗时为切削的）有效型面的范围之內，則不使用和工作齿輪（成对齿輪）相符合的測量齿輪也能够保持檢驗条件的同一性，因为过渡曲綫的点可能在有效型面上，所以在有效型面的范围之內滚动，对于檢查齿根处的过渡曲綫沒有干涉是必須的。另一方面，在有效型面范围之外檢查是不合适的，因为这可能导致对产品质量的錯誤的估价。

在有效型面范围內滚动是靠調整仪器上的被檢驗齿輪与測量齿輪之間的計算中心距的办法来保証。必需的計算中心距可由下列关系求得：

$$A = \frac{\rho_{eu} + \rho_{ik}}{\sin \alpha}$$

式中 ρ_e 及 ρ_i 为測量与被檢驗的齿輪在齿頂圓处和开始接触点的曲度半徑。

檢量时的啮合角由下式决定：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho_{eu} + \rho_{ik}}{r_{ou} + r_{ox}}。$$

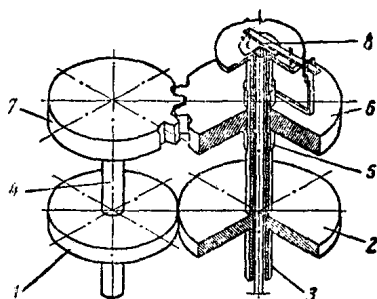


图1 綜合单面齿形檢驗法的原理图：

- 1及2—实现精确傳动的摩擦圆盘；
3及4—摩擦傳动軸；5—測量齿輪6
的空心軸；7—被檢驗的齿輪；8—軸
3及軸5相对轉动的自动記錄器。

測量齒輪在齒頂圓周處的曲度半徑如下式：

$$\rho_{eu} = \sqrt{R_{eu}^2 - r_{ou}^2}$$

如果圖上未注明時，齒輪在開始接觸點的曲度半徑為：

$$\rho_{ik} = \rho_{ek} - \varepsilon t_0,$$

式中 ε ——在傳動工作時（即當被檢驗齒輪與其成對齒輪相嚙合時）的重疊比。

在檢驗時，必需的中心距離可以用另外的方法確定，例如利用成對齒輪和傳動機構中心距離的尺寸。

在單面齒形檢驗時不像在雙面齒形滾動時那樣要求其在測量時和使用時的嚙合角相等。因為利用檢驗齒輪齒型漸開綫上的任何一段將都不會改變在嚙合綫上多余的移動。這些折算到基圓半徑上的附加移動，決定了附加轉角的大小。

當利用齒條作為測量元件時，應當考慮其原始誤差是沿嚙合綫而增加的，而在測量時的移動則是在齒條的節綫方向，故必須考慮到外形的齒型角

$$\Delta F_{\theta} = \frac{\Delta F_n}{\cos \alpha_{\theta}}。$$

在所研究的測量方法中，與測量標準件不斷的單面齒形嚙合是綜合檢驗的典型情況，因為得到的結果是產品運動精度的綜合的鑑定，並且表明隨着齒輪轉角位置的誤差不斷的改變（見圖2）。這一結果在測量一系列個別的誤差（基圓齒距、齒型、齒距的積累誤差）時僅能近似的得到，同時它們能精確地給出綜合單面齒形誤差主要組成部分的數值。

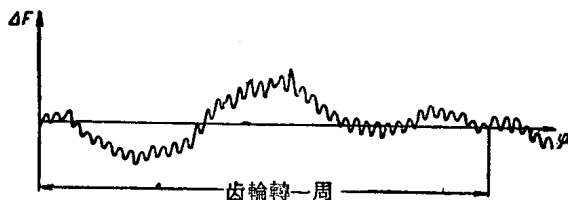


圖2 齒輪的單面齒形誤差的圖解。

因为制造出可靠的仪器来实现綜合单面齿形檢驗法尚有困难，因此到目前为止这种方法还很少推广。仪器应该是：在随意改变傳动比的情况下，两轉动系統之間具有准确的运动联系，而且其偏离量在全轉內不大于 $20''$ 和在 30° 內小于 $5''$ 。

图3所示是用于綜合单面齿形檢驗的各种仪器的簡图。

图4所示是互换性局（苏联）制造的用綜合单面齿形法檢驗齿輪的仪器簡图。在仪器中精确的傳动是由摩擦—斜面机构完成的，用調整斜面角度的方法来改变名义傳动比。

图5所示是用于单面齿形嚙合法檢驗小模数齿輪的MT-2型檢驗仪簡图。該檢驗仪的測量元件采用齿条形式的。

单面齿形檢驗仪的缺点是采用摩擦傳动，只能在試驗室的条件下才能可靠的工作。

只有在仪器具有极为簡單、短而可靠的运动鏈的基础上，才有可

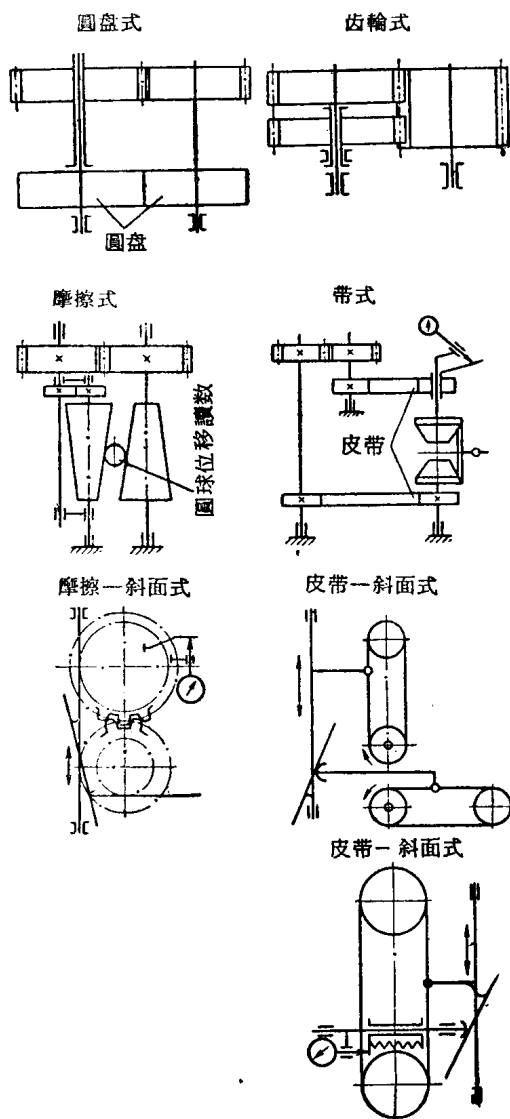


图3 綜合单面齿形檢驗仪簡图。

能把单面综合齿形检验方法运用到大量生产的条件中，使它机械化或自动化。

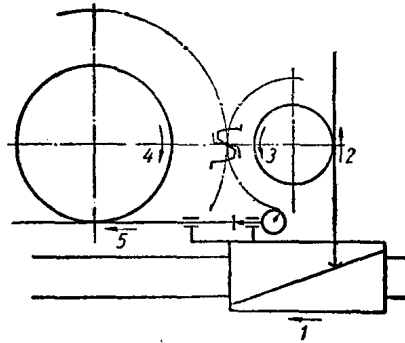


图4 有测量齿轮的摩擦-斜面式综合单面齿形检验仪简图:

- 1—带调整斜面的纵向滑座运动；2—转动摩擦盘3的横向滑座运动；3，
4—通过齿轮传动由盘3带动的摩擦盘的运动；5—当精确的齿轮传动与纵
向滑座1的运动相合时摩擦尺的运动。

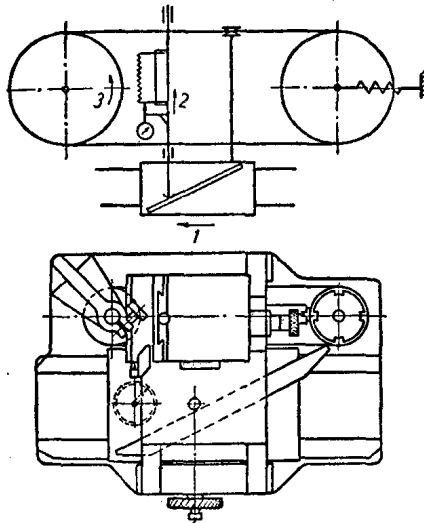


图5 有测量齿条的皮带-斜面式综合单面齿形检验仪简图:

- 1—带调整斜面的纵向滑座运动；2—带活动的测量齿条滑座的横向滑座
运动；3—圆盘同被检验的齿轮一起的转动，

互換性局和莫斯科工具工廠按照著者建議的簡圖(圖 6)製造的帶有中間齒輪的檢驗儀滿足了上述的這些條件。圖 7 為該檢驗儀的外觀圖。測量齒輪 1 應與被檢驗齒輪 2 有同樣的幾何參數(齒數、基圓齒距及在基圓柱上的傾斜角)。兩個齒輪裝在兩個同心心軸上,同時跟他平行的軸 4 上的中間齒輪 3 的輪齒相嚙合。被檢驗齒輪 2 的誤差引起它對測量齒輪 1 的相對轉動。這種轉動作用在任何樣的傳感器上表示局部的摆动幅度及每轉的摆动幅度。必須指出,如果中間齒輪的誤差沿著每一個輪齒的長度保持不變時,則並不影響儀器工作的準確度。在大量生產的條件

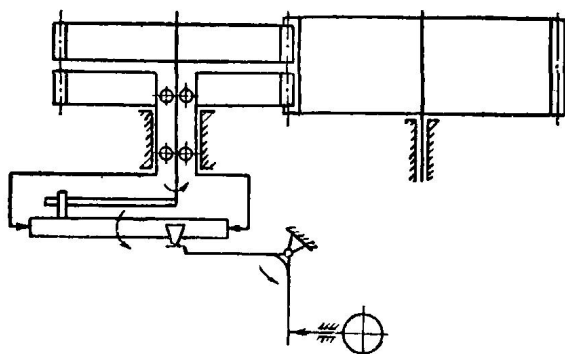


圖 6 帶中間齒輪的綜合單面齒形檢驗儀簡圖。

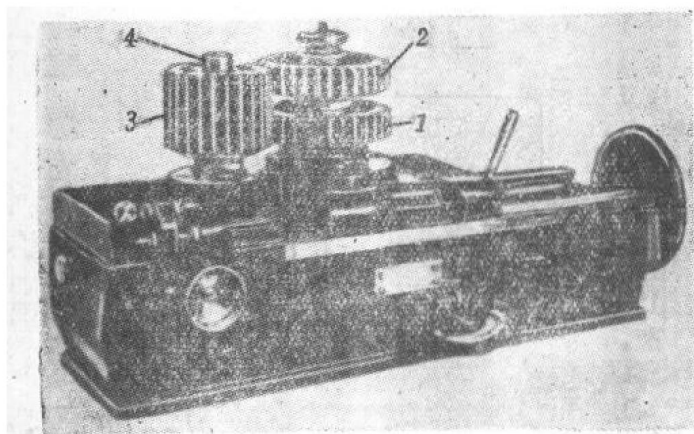


圖 7 車間用的綜合單面齒形檢驗儀。

下，檢查每種類型的齒輪要求有自己的測量齒輪並不算是麻煩的，因為在現在每個被檢驗的齒輪都是要用和它一樣標準的成對齒輪來檢驗的。

對於雙向轉動的傳動機構，必須檢查其齒形兩面的單面齒形誤差。為此，任何單面齒形檢查儀也同樣應該可以反轉。圖 8 表示左右兩齒型面的單面齒形誤差，在反轉的時候可以確定在該嚙合階段的側面間隙 C_{n_0} 的大小。在任何嚙合階段的側面間隙值應為

$$C_n = C_{n_0} - (\Delta F_{\lambda} + \Delta F_n),$$

這一數值相當於兩個單面齒形誤差曲線之間的區間（圖 8）。

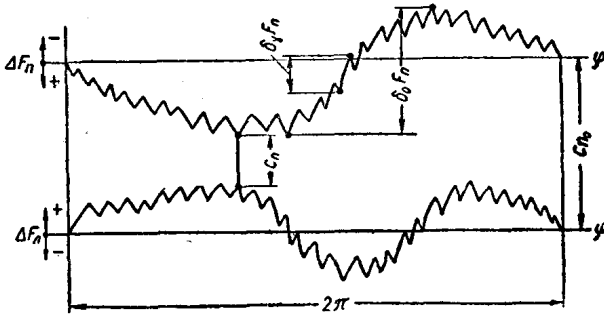


圖 8 左右型面的單面齒形誤差圖解：

ΔF_{λ} 和 ΔF_n —左右兩型面的單面齒形誤差； δ_{0F_n} —齒輪右型面在一周中的最大單面齒形誤差； $\delta_{\gamma F_n}$ —右型面最大的局部單面齒形誤差； C_{n_0} —在開始階段的側隙； C_n —最小的側隙。

表明齒輪工作特性的誤差按下式確定：

位置誤差 $\Delta F = f(\varphi);$

位移誤差 $\Delta F_{\text{移}} = \Delta F_{\kappa} - \Delta F_n;$

速度誤差 $\Delta v = \frac{d(\Delta F)}{dt} = \frac{d(\Delta F)}{d\varphi} \omega;$

加速度誤差 $\Delta a = \frac{d(\Delta v)}{dt} = \frac{d^2(\Delta F)}{dt^2} = \frac{d^2(\Delta F)}{d\varphi^2} \omega^2.$

為了加速綜合單面齒形檢驗過程，同時查明輪齒之間的側隙大小，以及減輕對測量結果的工藝分析，作者曾提出按雙型面系