

切削加工过程的 自动化控制

[苏] Д. Д. 麦德维杰夫 著

吴天林 译

02.35

国防工业出版社

内 容 简 介

本书探讨了在采用自动化控制的通用金属切削机床上，提高零件加工质量和生产率的方法。对应用电子计算机的切削加工过程自动化控制系统（АСУПОР）、信息和小调整子系统作了概述。

还对拟定技术约束方程式所必需的加工过程数学模型的基本关系式作了推导。提出信息化和最佳化的原理和方法，给出确定控制参数的算法和程序。最后阐明进一步提高加工质量指标的途径。

本书可供机器制造厂企业和设计院的工程技术人员、大专院校有关专业的师生参考。

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Д. Д. Медведев

Машиностроение 1980 г

*

切削加工过程的自动化控制

〔苏〕Д. Д. 麦德维杰夫 著

吴天林 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 5⁷/₈ 122 千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷 印数：0,001—8,000册

统一书号：15034·2523 定价：0.63元

前 言

提高机器的可靠性和制造时取得高的技术经济指标是现代机器制造的重大任务。要解决这项任务，在很大程度上需依靠保证所要求的加工质量的可靠性，而加工质量则由工艺过程的稳定性、切削用量、刀具的几何参数及其尺寸耐用度、工艺系统的弹性变形和热变形、机床调整及其几何精度和其他一些因素所决定。在这些多种影响因素和给定要求的条件下，重要的是要从预测加工过程转移到控制加工过程上来。要达到这个目的，可以采用便于创制自动控制系统的电子计算机。

在小批和成批生产条件下，产品名目繁多经常更新，从而要求采用通用的设备和装置，以及相应的保证规定质量和加工生产率的技术措施。

应用两级自动化控制系统，有助于取得规定的加工质量。在这种系统中，对实现工艺过程实际条件的最佳控制参数，是用电子计算机来确定的，而在制造具体零件或一批零件时，则用自动小调整子系统来补偿误差。

为了自动化系统的正常工作，建议要有工艺系统的元素、实现工序的条件、基本误差形成的规律性等信息，以取得加工过程的数学模型，并把它和确定加工误差的算法最佳化。

两级自动化系统改进了工艺过程的控制，在小批和成批

IV

生产中能提供显著的技术-经济效果。使加工精度提高了7~9倍,基本时间缩短了 $1/2\sim 3/5$,保证了规定的加工表面质量。这种系统能同时解决精度、粗糙度与零件表面层的物理-机械性能,以及所要求的加工生产率等问题,应当认为是提高机工-装配生产质量和数量指标的潜在力量。

目 录

保证切削加工高质量的现代方向.....	1
加工精度的计算.....	14
用于自动化控制的工艺信息的准备.....	53
切削加工过程的最佳化.....	73
АСУППОР 的自动小调整子系统.....	96
控制加工质量的工艺方法.....	115
自动化控制系统的研制、使用和效果.....	155
结束语.....	172
附录.....	174
参考文献.....	181

保证切削加工高质量的现代方向

切削加工工艺过程的质量指标和数量指标

现代机器工作规范强度的提高，对机器可靠性和耐久性的高要求，必须在高数量指标的条件下保证规定的加工质量——精度和表面层质量。这就要求机器零件的加工工艺过程要有新的控制形式。

零件精度，是以完工零件的参数对图纸规定的参数相比较的符合程度来表示的。这种符合程度是根据线尺寸精度、几何形状精度和表面的相互位置精度来规定的。所以加工精度是一个综合性概念。

要保证规定精度和确定零件的制造公差，必须知道表征加工精度的总误差。总误差决定于产生基本误差 Δ_i 的一系列工艺因素。基本误差包括：刀具尺寸磨损所产生的误差；工艺系统各环节的弹性变形和热变形，以及几何不准确度所引起的误差，毛坯在机床上的安装误差和制造尺寸调整误差。

如果加工公差 δ 大于加工过程中所产生的总误差

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i, \text{ 即}$$

$$\delta \geq \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (1)$$

在此条件下，可获得规定的加工精度。

在制造零件时，首先是制造高精度零件时，为实现这个条件，往往必须在工艺过程中插进补充的精加工工序和光整加工工序，并采用适当的加工方法和切削用量。这些与提高零件制造精度有关的措施，会使加工成本显著增长，例如，随着磨削精度从 0.1 毫米提高到 0.02 毫米，成本增长 4 倍^[5]。

机器零件的主要使用性能，不仅与零件的制造精度有关，并且在很大程度上决定于以粗糙度、浓度，以及表面层的物理-机械性能来表示的零件表面质量。

加工表面的粗糙度按 ГОСТ2789-73 评定，其中对粗糙度规定了三种高度参数 (R_a 、 R_z 和 R_{max}) 和三种纹距参数 (S 、 S_m 和 t_p)。表面粗糙度决定于切削用量、刀具的几何参数和形状、被加工材料、工艺系统刚度和润滑冷却液。切削深度对粗糙度几乎没有影响。进给量对不平度影响很大，特别在 $S \geq 0.15$ 毫米/转时。切削速度对粗糙度也有影响。这是因为有积屑瘤生成的缘故。在低切削速度 (1 ~ 2 米/分) 和高切削速度 (大于 70 米/分) 条件下，几乎没有积屑瘤形成而减少了粗糙度。当切削速度在 20 ~ 40 米/分时，积屑瘤最大，就相应地产生了最大的粗糙度。

表面粗糙度随着刀具偏角 φ 和 φ_1 的减小和刀尖圆角半径 r 的增加而降低。工艺系统的刚度也影响表面粗糙度。采用润滑冷却液可使粗糙度降低。

除了粗糙度以外，表面层的质量还用表面层的物理-机械性能来确定，在很多情况下，它确定了零件的耐磨性、强度、耐久性和其它的使用性能。

表面层的厚度 T 根据加工方法的不同，而在十分之几微米到十分之几毫米的范围内，它与零件的基体金属相比，还

有其它的机械、物理、化学性质和应力状态。表面层性质,在很大程度上由切削过程中发生的塑性变形和热影响的程度决定。

当切削力(它随着切深的增加而增加)、进给量和塑性变形程度增加时,就出现加工硬化和残余压缩应力。同时,随着切削速度的增加,析出的热量也越来越多,而力作用于零件的时间缩短了。结果造成表面层软化,降低了加工硬化度和微观硬度而形成拉应力。所以在不同的加工方法、切削用量和刀具几何形状的条件下,加工硬化扩展的程度与深度是不同的(表1)^[8]。

表1 加工方法对表面层性质的影响

加工方法	加工硬化率 $H_{\text{表面}}/H_{\text{内层}}$	硬化层深度 微米	加工方法	加工硬化率 $H_{\text{表面}}/H_{\text{内层}}$	硬化层深度 微米
车削			圆周铣	1.2~1.4	40~80
精车	1.2~1.5	30~50	钻孔和扩孔	1.6~1.7	180~200
细车	1.4~1.8	20~60	磨削		
铣削			外圆磨	1.4~1.6	30~60
端铣	1.4~1.6	40~100	(非淬火钢)		

工艺过程技术经济效果的定量评价决定于:

- 1) 零件的制造成本——能客观评定工艺过程加工经济性的基本的决定性指标;
- 2) 工艺过程全部工序的零件加工单件时间定额 $T_{\text{单件}}$, 和单件计算时间定额 $T_{\text{单件.计}}$;
- 3) 工艺过程全部工序的基本时间(工艺时间) T_0 ;
- 4) 生产定额 Π (劳动生产率)——在一定的组织-技术

条件下，在给定单位时间内可以加工出来的规定零件数。

除了上述指标以外，还可用按基本时间计算的机床利用率 η_0 ，材料利用率 η_M ，生产自动化程度和其它指标来评定工艺过程。

切削加工过程的控制系统

为了满足对加工质量和生产率的现代要求，重要的是不仅要保证预测工艺过程，并且要控制工艺过程。在最小劳动量的条件下取得高的产品质量。所谓控制过程应理解为对象和元件总体动作的组织化，以达到切削加工的规定精度、粗糙度和生产率。

切削加工过程精度的控制，可按下列几个方面来实现(图1)：1) 保证为作出判断而提供信息的信息控制^[7]；

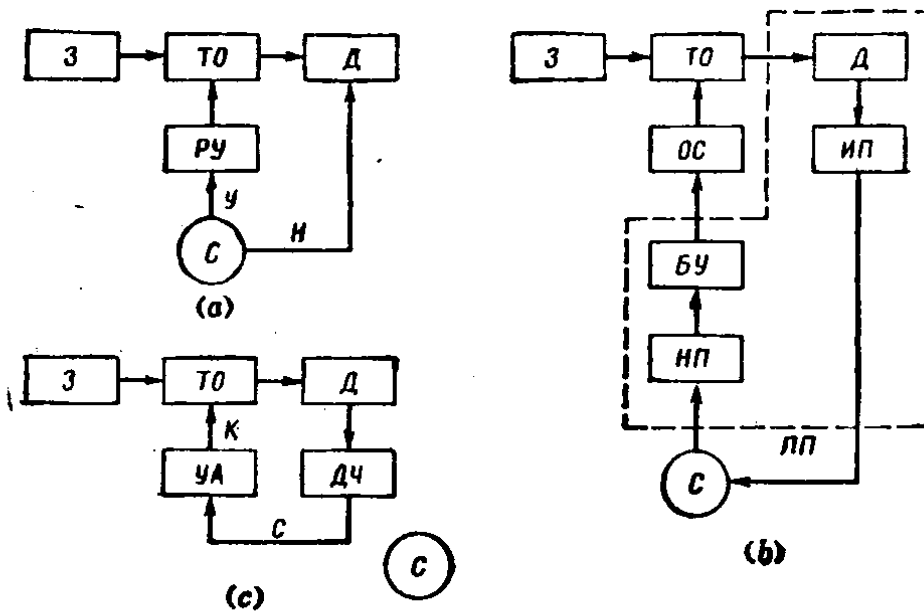


图1 切削加工过程的控制系统图

(a) 信息控制系统：З—毛坯；ТО—工艺工序；Д—零件；РУ—控制手柄；С—机床工人；Н—观察；У—控制。(b) 自动化控制系统：ОС—主要系统；ПП—小调整子系统；ИП—执行装置；ИП—调整程序；ИП—测量仪器；БУ—控制部件。(c) 自动控制系统：УА—自动控制器；ДЧ—传感器；С—信号；К—主令。

2) 确定实现工序最佳条件的自动化控制^[9]; 3) 按输入、输出参数来控制的自动控制^[14,15]。

在信息控制的条件下〔图1,(a)〕, 机床工人观察毛坯(零件)质量和工艺系统的状态, 对照观察情况, 考虑在进行加工过程中作出任何改变的可能性和合理性, 并利用控制机构来实现那些对达到加工精度、粗糙度和生产率认为是合理的改变。采用这种系统时, 机床工人以目检加工过程, 并用手工进行控制。其中包括实现保证最小误差、最长的系统工作时间的机床调整, 而不需小调整, 以及确定能取得规定零件质量的切削用量。

在自动化系统中〔图1,(b)〕, 毛坯质量、系统状态、加工过程和零件的参数是用仪器来检查的。在这种情况下, 机床工人用专用装置和仪器(采用执行机构、小调整装置、放大器等)来影响切削过程和系统。机床工人所采取的决定, 其合理性则由所得信息的可靠性和控制作用的准确性如何而定。在这系统中, 机床工人的主要任务是把仪器读数与标准值进行比较, 如果不符合, 就采取工艺文件中规定的解决办法。这样一来, 在自动化系统中, 取得信息、处理信息和控制切削过程, 都要有专职工艺人员参与和使用各种装置。专职工艺人员依据用机器计算的结果、加工过程的经验和知识, 来采取解决办法并使之实现。这就是系统功能的人-机方案。

若假定有了毛坯和系统, 其中为控制所必须了解的一切情况已全部知道, 而对加工过程的监督功能、对控制动作作出决定, 和实现这个控制动作都已机械化, 这就是不需要人参与的自动控制系统〔图1,(c)〕。在此系统中, 信号C由仪器(传感器)送到与工艺系统执行机构相联的判定装置。

用于切削加工过程的自动（适应）系统，可分为下列几类：1）稳定受控切削参数（切削力和热电势）的系统，其中包括自动控制弹性位移的系统；2）自动改变控制程序的系统；3）补偿工艺系统动态变形和热变形的系统；4）按精度和生产率使加工用量最佳化的系统。

采用自动系统可以提高切削加工过程的效果，包括减少由过载所造成的机床和毛坯损坏的危险性，减少加工过程对工人的依赖，自动选择最佳切削用量。这种系统的初期使用成果表明，可以降低毛坯的加工费用和减少制造误差。

但要在实践中实现自动系统的潜在可能性时，不能不考虑这项现代技术的一系列限制因素，也就是：自动化设备与装置的可靠性不够（保证能在切削区域中测量零件而又可靠地工作的传感器，以及带有为自动控制所必需的系统的机床都没有）；在受控加工过程中存在偶然性成分；系统的对象与外界环境相互影响的规律性复杂，和缺少工艺过程的完整信息。

对成批生产来说，切削加工的自动化控制，是保证零件加工高精度、低粗糙度和高生产率，且兼顾到很多影响因素、给定要求和具体条件的真正方向。

加工精度的控制

表征加工精度的误差，可以用精度图(图2)

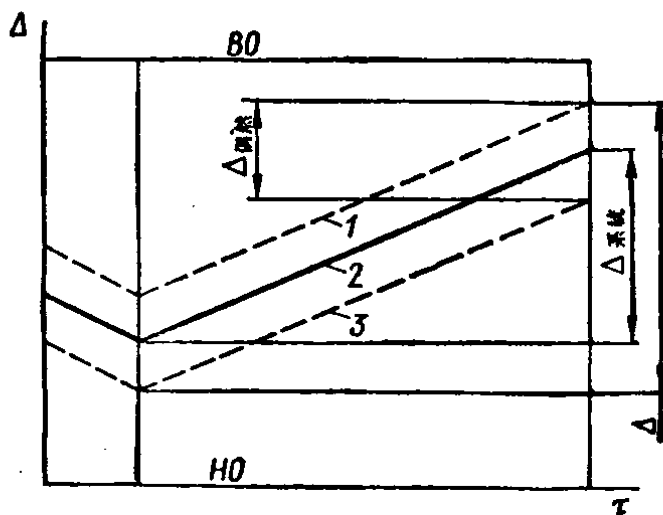


图2 外圆柱表面的理论加工精度图

1、3—偶然误差的上偏差与下偏差；
2—加工的综合曲线。

来研究其随时间 τ 或切削路程 L 的变化。

基本误差 Δ_i (由刀具尺寸磨损所引起的加工误差 Δ_{MB} ; 由机床、刀具、毛坯热变形所引起的误差 $\Delta_{\tau.c}$ 、 $\Delta_{\tau.H}$ 、 $\Delta_{\tau.S}$; 由机床的几何不准确度所引起的误差 $\Delta_{r.c}$) 的总和, 在精度图上所得到的综合曲线 2 —— 在系统误差影响下的加工总误差平均值的变化曲线, 系统误差确定制造尺寸聚集中心的位置; BO 线与 HO 线分别表示被加工零件尺寸偏差的上限和下限。

通过尺寸最大值和最小值的曲线 1、3, 它们间的距离代表偶然误差值 $\Delta_{\text{偶然}}$, 也就是确定零件尺寸相对于聚集中心变化的分散带。毛坯的余量不均匀和硬度变化, 机床调整误差, 毛坯安装误差和尺寸瞬时分散, 都影响分散带尺寸。

控制加工精度时, 首先必须修整即调配综合线, 使它离开平行于横坐标轴的任何直线的偏差最小, 其次是保证综合线分布在公差带范围内。

修整综合线可用三种方法进行: 1) 误差互相补偿法, 在电子计算机上, 对各种方案进行多次反复挑选; 2) 在公差带范围内采用小调整移动; 3) 在工艺准备期间确定最佳切削用量, 并在具体加工条件中保证这个切削用量。

应用第一种方法时, 用工艺参数进行修正, 可以改变表征各个基本误差的曲线 2 的位置。这样的处理办法, 可利用电子计算机对不同的方案进行多次反复挑选来实现。此法可对综合曲线 2 进行一定的矫直, 从而保证控制精度 (图 3)。但是这种方法的可能性受到限制, 因为通常在加工毛坯时, 没有全部补偿基本误差, 而在解决这项任务时, 没有重视粗糙度和加工生产率, 并且不考虑机床设备的技术特性。

采用第二种方法时，在公差带范围内，把综合曲线2移到主要误差上。例如，在加工刚性轴时，造成加工表面误差(锥度)的主要因素是刀具的尺寸磨损，和在工作过程中刀具受热伸长(相应的误差等于 $2\Delta_{\text{H3}}$ 和 $2\Delta_{\text{r.H}}$ ，而其容许值为 δ_{H3} 和 $\delta_{\text{r.H}}$ ，图4)。在此情况中，曲线2位置在时间 τ 期间的变化值

ΔX ，可以用按程序来保证曲线2位置的小调整装置来实现(移位线段曲线2'在规定公差范围内)。同时，因为这个方法不能保证最佳的加工过程进程，和兼顾全部影响因素，因此，其可能性还受到限制。

第三种方法是最常用的方法，是用自动化控制系统来实现的。在解决了第一、第二种方法可能性问题的条件下，应用这个方法，可以确定很多基本误差，并且能考虑到很多具体的加工条件。同时，这个方法还能用来补偿前一行程不准确度的信息误差，和缩小误差的分散范围。在这情况下，就能

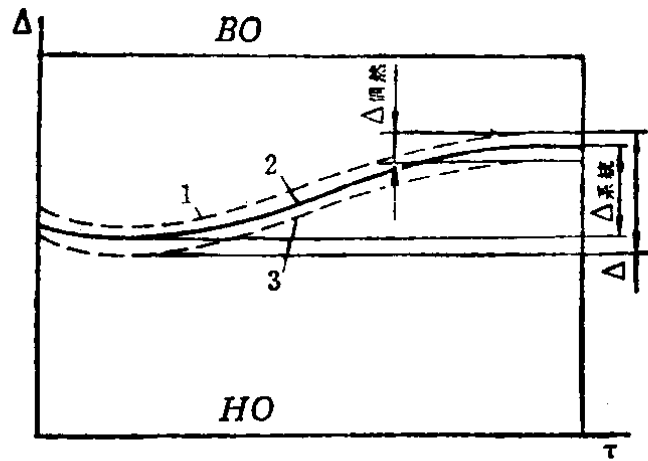


图3 表明误差相互补偿的加工精度图

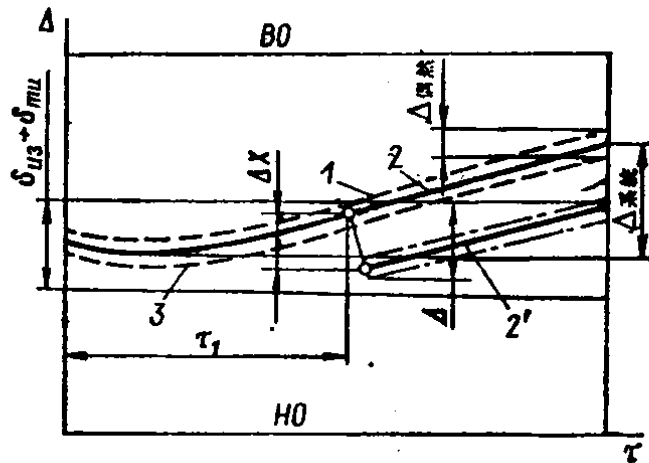


图4 应用小调整移动来减少主要误差时的加工精度图

考虑到对表面粗糙度、生产率，以及机床技术特性、毛坯质量和加工条件等要求，来确定相应数量的基本误差（图 5 和图 6）。

因此，要达到加工过程的最佳运行，可以用几种方法来实现。目前，保证获得高技术经济指标的最合理的方向，是切削加工过程的自动控制。

用电子计算机控制加工过程的自动化系统

在自动化控制系统中，达到加工过程最佳运行的办法，是利用电子计算机对实际完成工序的条件找出最佳切削用量，并在制造具体零件时，用小调整子系统来补偿误差。

图 7 所示为自动化控制系统的工艺结构总图。图中表示以闭环工作的主系统，和以开环工作的小调整装置子系统，后

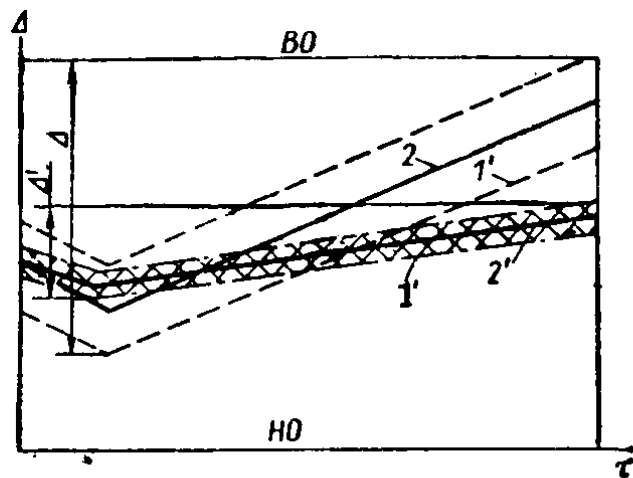


图 5 应用最佳 n 和 s 值条件下的加工精度图

2—一般加工条件下的综合曲线；2'—以 n_0 、 s_0 加工时的综合曲线。

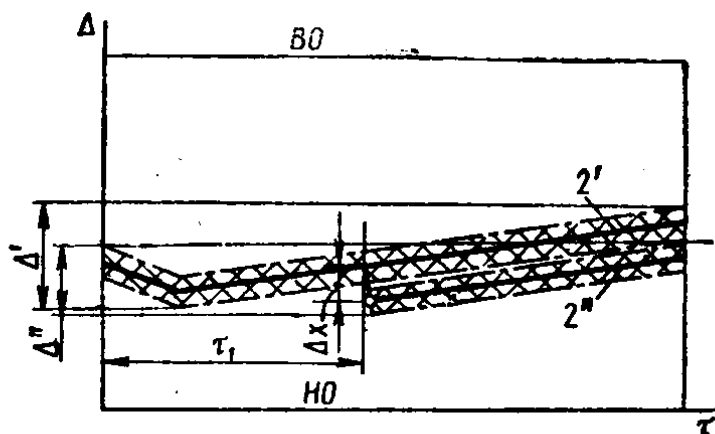


图 6 在加工过程自动化条件下的加工精度图

2'—以 n_0 、 s_0 加工的综合曲线；2''—应用小调整装置时的综合曲线。

者联接在主系统的工艺环节（机床）中。系统的控制过程分两个阶段实现：第一阶段——工艺准备和过程检查；第二阶段——在工位上加工具体零件。

第一阶段使用主系统，它保证收集和记录原始资料，在电子计算机上按标准程序处理信息，发送一组零件的最佳控制参数值（旋转频率 n_0 和进给量 s_0 ）。用算法检查并直接在工作地实现无废品的工作条件。人一机系统必须有工艺人员参与加工过程的控制，控制是分

散实现的。工艺人员为电子计算机准备确定最佳切削用量的全部原始数据，而程序员把计算机解题顺序的准确说明送入机器的记忆装置。电子计算机按采用的算法计算控制参数 n_0 与 s_0 、基本误差 Δ_i 和加工总误差 Δ ，并以定形文件输出。

调整工作程序时，在完工零件从切削区域退出以后进行检验（图7，位置8）。可以采用在毛坯上专门做出的凸缘、毛坯样件，或者具有相应几何参数和工艺特性的模型以便加工。所取得的加工质量信息，与比较装置9中所给定的调节量（ $\Delta_{\text{оп}}, Ra, T$ ）进行比较。当调节量数值等于给定值（ $\Delta_x = \delta; Ra_x = Ra; T_x = T$ ）时，系统处于平衡状态，就不需要

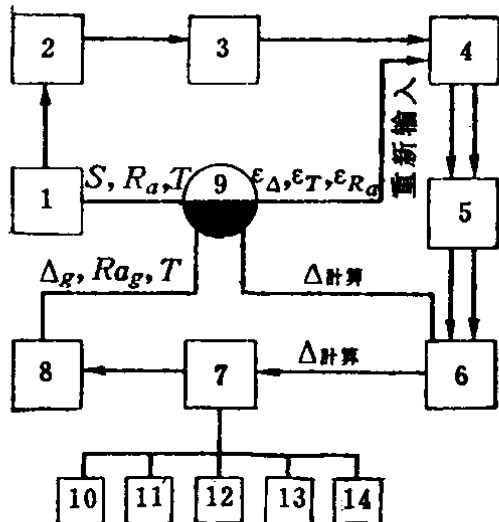


图7 自动化控制切削加工质量的结构图

- 1—收集原始数据；2—信息的准备和编码；3—穿孔；4—电子计算机；5—信号输出；6—译码机；7—工艺系统；8—测量仪器；9—比较装置；10—机床；11—夹具；12—小调整装置子系统；13—刀具；14—毛坯。

工艺人员干预。在相反的情况下，发生误差 (ε_{Δ} , ε_{Ra} , ε_T) 时，则必须对系统或切削过程施加影响，向计算机重新输入新的信息。所得到的程序可作为标准程序，用于在加工工艺上性质相同的毛坯。

但是应用按加工结果调整程序的办法，在第一阶段只能一般地把加工过程最佳化，因为编程序时，原始资料是按最坏的方案选取，而并非总是保持不变的，而数学模型则实际上可以具有不同的适应性。

加工具体零件时，必须注意改变着的过程参数，从控制的第一阶段录下每种功能，并把它传输给处理阶段。因此在第二阶段使用了按调整程序工作的自动小调整子系统。子系统自动地作用，其工作与机床的结构和运动无关。在加工过程中，机床工人只在工作地保证按程序确定加工过程进程的工艺参数值，考虑具体毛坯和加工条件，按程序调整小调整子系统，加工毛坯并检查加工过程的质量和数量指标。

自动控制可在一次工作行程和两次工作行程的加工中进行。在第一种情况中，工作进程使用由电子计算机确定的最佳的 n_0 和 s_0 值进行，并保证 2 级、2a 级精度；此时，子系统的调整程序，是按输入数据并考虑了主要的系统误差来编制的。

较高精度的零件，在两次工作行程中进行加工，也采用最佳的 n_0 与 s_0 值。在这情况下，对于在通用机床上加工的零件，其误差补偿方法，必须预先测量零件取得前一工作行程的误差信息，把此信息贮存起来，经过处理，并在下一工作行程中实现补偿。由于这个缘故，因此就有一条特别重要的原则：要控制得好些，必须测量得准确些。

因此，应用自动控制系统时，加工过程的控制方法应当是：1) 在电子计算机上根据取得最佳 n_0 和 s_0 的标准程序准备和处理信息（根据原始资料和相应的关系）；2) 确定加工总误差（根据拟定的算法），总误差应小于公差值。这是在加工过程自动化控制的条件下最佳化的主要准则。必要时还要确定粗糙度 Ra 与表面层缺陷 T 的数值；3) 按最佳的 n_0 与 s_0 值调整机床，并根据调整程序，调整小调整子系统。此时，应当考虑到具体毛坯的特点和工序条件，以保证进一步提高加工质量。

因而，自动化控制能保证收集和记录原始资料，在电子计算机上处理数据，发送最佳 n_0 与 s_0 值，还考虑到单独零件的具体特点和实施工序的条件。自动控制系统能在考虑了大量因素的条件下，解决寻找和实现加工过程的最佳方案问题，并能在不同磨损程度的通用设备上，保证加工的高质量和高数量指标。同时，由于在切削区域中测量困难，提出了放弃使用传感器的可能性，而应用前一工作行程不准确性的信息来补偿误差。与此同时，解决了减小误差分散带的问题。

自动化控制的重要优点，是能够在工艺准备阶段，毛坯加工之前，评定零件的精度和生产率。同时，如果精度评定表明，总误差和其他的加工质量指标大于容许值，能查明低质量的可能原因，可以采取必要的措施来排除这些原因，并在该批零件的电子计算机标准程序中加入修正。这种方法对保证所要求的生产率来说是正确的。所研究的方向可以在达到精度与生产率的条件，从主观臆断和直觉转到客观的计算方法和控制加工过程上去。

电子计算机的应用，改变了工艺人员的工作性质，解除