

工艺过程自适应控制

〔苏〕 Ю. М. 索洛明敏采夫

В. Г. 米特罗范诺夫

С. П. 波罗托波波夫

И. М. 雷勃金

В. А. 季米利雅捷节夫

高文龙 译

李俊山

吴亢 校

机械工业出版社

本书是介绍在金属切削机床上进行工艺过程自适应控制的专著。全书共八章，主要内容：用广义坐标描述零件几何精度的方法，零件精度基本指标间的函数关系，工件的安装阶段、静态和动态调整阶段的尺寸关系，加工的最优准则；选择工艺过程的信息源，控制工件的安装精度，控制工艺系统的静态、动态调整的方法；控制工艺系统热变形、工件表面质量、刀具磨损及零件表面粗糙度的方法；控制工艺系统的尺寸调整和重新调整的方法和手段；控制机床工作循环的方法；零件加工工艺过程的最优化；加工工艺过程自适应控制系统的制定及典型机床的自适应控制系统。

本书可供机械制造专业教师 and 研究生，以及机械制造工厂工程技术人员和有关科研院所科研人员参考。

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

(на металлорежущих станках)

Ю. М. СОЛОМЕНЦЕВ, В. Г. МИТРОФАНОВ,
С. П. ПРОТОПОПОВ, И. М. РЫБКИН, В. А. ТИМИРЯЗЕВ

Издательство «Машиностроение» 1980г.

* * *

工艺过程自适应控制

〔苏〕 Ю. М. 索洛明敏采夫

В. Г. 米特罗范诺夫

С. П. 波罗托波波夫

И. М. 雷勃金

В. А. 季米利雅捷节夫

高文龙 李俊山 译

吴 亢 校

*

责任编辑：孙祥根

封面设计：郭景云

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一零）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张17 · 字数450千字

1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷

印数 10,001—3,500 · 定价：4.90元

*

统一书号：15033·6767

目 录

第一章 质量、生产率和成本——工艺过程的基本指标	1
1.1 零件的精度——质量的主要指标	1
1.2 机器零件质量的获得	10
1.3 在机床上加工零件的生产率和成本	44
第二章 提高零件加工精度和生产率的工艺	
过程自适应控制	63
2.1 选择工艺过程完成状况的信息源	63
2.2 控制工件的安装精度	86
2.3 控制工艺系统的静态调整	110
2.4 控制工艺系统的动态调整	120
2.5 综合控制工艺系统的静态和动态调整	137
第三章 为提高加工精度和生产率, 控制工艺过程的其它	
因素	145
3.1 工艺系统的热变形及其控制	145
3.2 控制工件的表面质量	166
3.3 控制刀具的磨损	177
3.4 控制零件的表面粗糙度	185
第四章 控制工艺系统的尺寸调整和重新调整	190
4.1 尺寸调整和重新调整的任务及本质	190
4.2 在程序控制机床和由数字程序控制机床及多用途机床所组成的自动化工段上, 工件加工误差的构成	216
4.3 工艺系统调整和重新调整过程的控制方法和手段	232
第五章 机床工作循环的自适应控制	271
5.1 用测量载荷或加速度的方法确定刀具与工件接触的时刻	271
5.2 以刀具移动轨迹的自适应控制为基础, 实现余量的自动分配	274
5.3 确定建立自适应控制系统的合理费用范围	285
第六章 机床上零件加工工艺过程的最优化	289
6.1 最优化问题的状况及其建模方法	289

Ⅶ

6.2	求解大批和小批生产最优化问题的特点	345
6.3	工艺过程工序的设计基础	386
6.4	零件加工工艺过程工序的最优化	402
第七章	在金属切削机床上加工工艺过程自适应控制系统的制定	429
7.1	自适应控制的工艺系统	429
7.2	作为控制对象的工艺系统	434
7.3	被控制量测量装置的选择	460
7.4	对金属切削机床自适应控制系统应用的放大—转换装置的评估	480
第八章	在自适应控制机床上解决的工艺问题	481
8.1	液压进给传动机床的自适应控制系统	481
8.2	通用金属切削机床的自适应控制系统	505
文献		525
俄文角标注释		530

第一章 质量、生产率和成本——工艺过程的基本指标

1.1 零件的精度——质量的主要指标

为实现机器的功能，必须为其规定必要的质量指标。与机器的功能相适应的综合指标决定了整个机器的质量。机器制造工艺学的基本任务之一是用最低的费用获得机器及其零件所需的质量。精度是机器和零件质量的主要指标。在产品制造过程中达到所需的精度需要克服很多困难。机器或零件的精度可以理解为它们的几何形状与理想几何形状相符合的程度〔8〕。表面间的距离或单一表面的尺寸精度、表面的相对回转精度、表面的几何形状精度（包括宏观几何形状，以及波纹度和粗糙度）均是零件精度的指标。

机器精度同样用上述精度指标来描述，但对机器而言，指的是机器工作表面的精度。另外机器工作表面在工作过程中所实现的相对运动精度也是机器精度的基本指标之一。

用广义坐标描述零件的几何精度 机器零件的表面按功能可以分为四类：工作表面、定位表面（基本基准）、辅助定位表面（辅助基准）和自由表面〔8〕。

零件的工作表面实现机器的功能。主要定位表面用来确定零件在产品中的位置，而借助于辅助定位表面确定与该零件相连接的其它零件的位置。自由表面是与其它零件不接触的表面。

描述零件几何精度的目的，在于表达和计算该零件工作表面、定位表面和自由表面之间的空间尺寸关系。为此，所确定的坐标系必须与零件的工作表面及它的基本和辅助基准组中的每一个表面相联系。建立所述坐标系的理论前提如下。

根据定位原理，零件在产品中所要求的位置是用施加在零件

上的六个约束达到的，在 $oxyz$ 笛卡尔坐标系中，这些约束限制了零件在三个轴线方向上的自由移动和三个绕这些轴线的回转。如果根据机器的功能，需要零件按指定的规律移动，那么六个约束保证零件在 $oxyz$ 系统中所考虑的每一瞬时有所需的位置。这些关系需借助于布置在零件主要定位表面上的支承点和必要的作用力具体体现出来。设置在主要定位表面上有六个支承点，每一个支承点限制零件的一个自由度，零件需具备一组三个基准面，它们分别与被确定的坐标平面相对应。三个与基本基准兼有的坐标平面共同构成了零件的基本基准坐标系 $OXYZ$ 。根据与基本基准相联系的 $OXYZ$ 坐标系的位置，可以确定所研究零件在机床或其它产品中占据的位置。

零件的辅助定位表面在一般情况下同样也构成一组三个基准面，在它们上面布置的六个支承点限制了被连接零件的全部六个自由度。这组三个基准面构成了零件的辅助基准坐标系 $oxyz$ 。零件的基本和辅助基准坐标系设置方法如下。将一个坐标平面（例如 XOY 平面）与零件的定位表面或它的轴线相重合，在它上面布置三个支承点，限制零件在一个轴线方向的移动和绕两个其它轴线的回转。设置与 XOY 平面垂直的第二个坐标平面（例如 XOZ 平面），使它与零件一个定位平面或一个轴线相重合，在它上面布置两个支承点，限制零件的一个移动和一个回转。将第三个坐标平面（例如 YOZ 平面）与 XOY 和 XOZ 平面垂直，使它通过零件上一个定位表面或一个轴线，在它上面布置第六个支承点，限制零件在第三个坐标轴方向上的移动。基本和辅助基准面的坐标平面可以通过对称轴线或最可提供有关零件位置的特征表面，即通过零件的中心。例如，在图 1.1 中提供了刀架简图，图中绘出了基本和辅助基准的坐标系。

如果把 $OXYZ$ 坐标系与零件的主要定位表面相联系，而把 $oxyz$ 系统与辅助或工作表面相联系，那么零件的辅助定位表面相对于基本基准的位置就可以像 $oxyz$ 系统在 $OXYZ$ 系统中的位置那样来确定。

在 $OXYZ$ 系统中的 $oxyz$ 系统原点的三个坐标 A 、 E 、 B ，以及 $oxyz$ 系统相对于 $OXYZ$ 系统依次回转的三个角度 λ 、 β 、 γ 确定了辅助基准系统在基本基准坐标系中的位置。

三个坐标 A 、 E 、 B 和三个角度 λ 、 β 、 γ 构成了列矩阵 k ，它称作零件辅助基准组矩阵或简称为辅助基准矩阵。

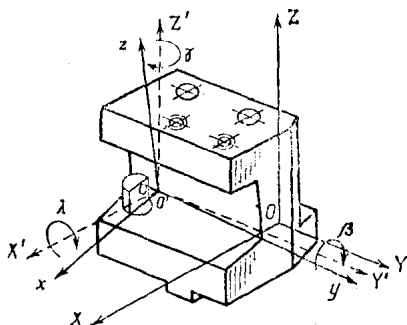


图1.1 刀架本体基本和辅助基准的坐标

$$k = \begin{pmatrix} A \\ E \\ B \\ \lambda \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = (A, E, B, \lambda, \beta, \gamma) \quad (1.1)$$

矩阵 k 的元素是广义坐标，借助于它能够确定零件精度的主要指标，即定位表面各个部分上的辅助基准相对于基本基准的距离和偏转。

组成平行位移向量 $r = (A, E, B)$ 的坐标 A 、 E 、 B 说明了零件的辅助基准相对基本基准的距离。而三个角度确定了零件的辅助基准相对于基本基准的偏转，它们组成了相对偏转的向量 $a = (\lambda, \beta, \gamma)$ 。

广义坐标值可以直接由图纸上分析零件功能而得到。知道了矩阵 $k = (A, E, B, \lambda, \beta, \gamma)$ 的元素就能够计算零件在定位表面任何点中的基本和辅助基准之间的距离。从零件的一个定位表面到另一个定位表面的最短距离是一个基准到另一个基准的垂直距离。这就是说从零件的主要定位表面的点到辅助基准的距离是在

$oxyz$ 系统中点 $N(X, Y, Z)$ 的坐标。它们可以按公式 $x = \bar{r} + \pi \bar{X}$ 来计算, 用矩阵形式表示为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - A \\ Y - B \\ Z - B \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

把用元素 l, m, n 所提出的方阵称为变换的正交矩阵, 式中 l, m, n —— $oxyz$ 系统和 $OXYZ$ 系统的相应坐标轴之间夹角的余弦;

$$\pi = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(xX) & \cos(xY) & \cos(xZ) \\ \cos(yX) & \cos(yY) & \cos(yZ) \\ \cos(zX) & \cos(zY) & \cos(zZ) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

方程式 (1.2) 的展开式记为

$$x = l_1(X - A) + m_1(Y - B) + n_1(Z - B)$$

$$y = l_2(X - A) + m_2(Y - B) + n_2(Z - B)$$

$$z = l_3(X - A) + m_3(Y - B) + n_3(Z - B)$$

当基本基准和辅助基准的坐标平面相平行时, 相当于移动 $oxyz$ 坐标系, 进行坐标变换, 这时

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

此时, 确定零件基本基准和辅助基准之间距离的公式 (1.2) 记为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X - A \\ Y - B \\ Z - B \end{pmatrix}$$

从零件辅助定位表面的点到基本基准的距离是在 $OXYZ$ 系统中点 $m(x, y, z)$ 的坐标。这些距离可以按下式确定

$$\bar{X} = \bar{r} + \pi^T x \quad (1.4)$$

式中变换的转置矩阵为

$$\pi^T = \begin{vmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) & \cos(zX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) & \cos(zY) \\ \cos(xZ) & \cos(yZ) & \cos(zZ) \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

转置矩阵 π^T 写成正交矩阵 π 的逆: $\pi^T = \pi^{-1}$ 。

所以在分析空间尺寸时,要同时考虑零件的尺寸和表面的回转,两个定位表面间距离的概念具有相对性。它取决于对什么样的基准必须进行测量和在什么样的坐标系中进行测量。如果必须测量从位于辅助定位表面上的点 $M(x, y, z)$ 到基本基准的最短距离,那么测量必须在零件的基本基准坐标中进行。同样,如果必须测量从基本基准的点到辅助定位表面的最短距离,那么测量必须在辅助基准坐标中实现。两个定位表面距离的概念仅仅在被研究的表面平行的条件下才具有确定性,当发生定位表面的相对回转时,应当指出对哪一个表面必须测量距离,因为这决定读数系统的正确选择。

在描述零件表面的相互关系时,必须用相应坐标系的偏转角来表示一个表面相对于另一个表面的倾斜程度。以所确定的坐标系 $OXYZ$ 、 $oxyz$ 形式出现的零件基本基准和辅助基准以及广义坐标的概念可以将辅助定位表面相对于主要定位表面的倾斜角作为广义坐标 λ 、 β 、 γ 的函数给以求解。

两个平面间的夹角等于它们法线间的夹角[56]。按照这个道理,坐标平面 zoy 相对于平面 ZOY 的倾斜角等于轴线 ox 和 OX 间的夹角 ψ_1 ; xoz 相对于平面 XOZ ——轴线 oy 和 OY 间的夹角 ψ_2 ; xoy 相对于平面 XOY ——轴线 oz 和 OZ 间的夹角 ψ_3 。

零件基本基准和辅助基准坐标轴线间的夹角可以借助于变换的正交矩阵 π 来确定。使我们感兴趣的角度 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 的余弦是转置矩阵 π^T 沿主对角线分布的元素 l_1 、 m_2 、 n_3 。

这就是说,写成展开式

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \arccos(xX) \\ \psi_2 &= \arccos(yY) \\ \psi_3 &= \arccos(zZ) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

考虑到 $oxyz$ 系统围绕垂直于所研究辅助基准的坐标轴回转，而不改变它相对于基本基准表面的倾斜，那么可以记为：

$$\cos\psi_1 = \cos\gamma\cos\beta; \quad \cos\psi_2 = \cos\gamma\cos\lambda; \quad \cos\psi_3 = \cos\beta\cos\lambda$$

所以，最后可得到：

坐标平面 yoz 相对于平面 YOZ 的偏转角

$$\psi_1 = \arccos[\cos\gamma\cos\beta] \quad (1.7)$$

坐标平面 xoz 相对于平面 XOZ 的偏转角

$$\psi_2 = \arccos[\cos\gamma\cos\lambda] \quad (1.8)$$

坐标平面 xoy 相对于平面 XOY 的偏转角

$$\psi_3 = \arccos[\cos\beta\cos\lambda] \quad (1.9)$$

有时辅助定位表面相对于基本基准的偏转通过相应倾斜角的正切来表示是方便的。为了得到所研究角度 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 的正切，利用三角关系式：

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\psi}}{\cos\psi} \quad (1.10)$$

将所得到的余弦值代入公式 (1.10) 中，并进行换算得到

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\gamma\cos^2\beta}}{\cos\gamma\cos\beta} \quad (1.11)$$

当 $\beta = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_1 = \operatorname{tg}\gamma$ ；当 $\gamma = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_1 = \operatorname{tg}\beta$

$$\operatorname{tg}\psi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\lambda\cos^2\gamma}}{\cos\lambda\cos\gamma} \quad (1.12)$$

当 $\lambda = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_2 = \operatorname{tg}\gamma$ ；当 $\gamma = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_2 = \operatorname{tg}\lambda$

$$\operatorname{tg}\psi_3 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\lambda\cos^2\beta}}{\cos\lambda\cos\beta} \quad (1.13)$$

当 $\lambda = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_3 = \operatorname{tg}\beta$ ；当 $\beta = 0$ 时， $\operatorname{tg}\psi_3 = \operatorname{tg}\lambda$

零件精度基本指标间的函数关系 显示零件精度基本指标间的关系，在于确定所研究零件的尺寸、相对偏转和定位表面形状误差间的函数关系。平行表面间的尺寸乃是在这些表面上的两个

对置点间的距离。按照这个道理，两个定位表面间的尺寸是它们之间的垂直线距离〔譬如，从主要定位表面的点 $N(X, Y, Z)$ 到与辅助定位表面的相交点的距离〕。

两个表面对置点间的距离是相对距离、偏转和零件表面平面度的函数。零件基本基准的辅助表面的距离说明 $oxyz$ 系统原点在 $OXYZ$ 系统中的坐标 (A, B, B) 。因而，被 $oxyz$ 系统的平行移动误差所决定的距离偏差 Δ_{Lc} 由列矩阵确定

$$\Delta_{Lc} = (\Delta_A, \Delta_B, \Delta_B) \quad (1.14)$$

矩阵的元素是点的向量半径偏差。向量半径 $r(A, B, B)$ 的上下允许偏差同样构成相应的矩阵：

$$\Delta_{rLc} = (\Delta_{rA}, \Delta_{rB}, \Delta_{rB}) \quad (1.15)$$

$$\Delta_{nLc} = (\Delta_{nA}, \Delta_{nB}, \Delta_{nB}) \quad (1.16)$$

这两个矩阵的差值

$$\delta = \Delta_{rLc} - \Delta_{nLc}$$

确定向量半径 $r(A, B, B)$ 分量的公差矩阵：

$$\delta_{Lc} = (\delta_A, \delta_B, \delta_B) \quad (1.17)$$

由零件辅助表面相对于基本基准的角度位置精度的给定偏差会引起相应表面间距离的附加变化 $\Delta_{L\alpha} = (\Delta_{x\alpha}, \Delta_{y\alpha}, \Delta_{z\alpha})$ 。用广义坐标表示零件几何精度，可以将这些偏差当作相对偏转误差和研究点坐标的函数。 $\Delta_{L\alpha} = F[(\Delta_\lambda, \Delta_\beta, \Delta_\gamma), (X, Y, Z)]$

辅助表面相对于基本基准的偏转精度偏差表现为相应的广义坐标增量 $\Delta_\alpha = (\Delta_\lambda, \Delta_\beta, \Delta_\gamma)$ 。由功能所允许的偏转角上下偏差构成矩阵：

$$\Delta_{B\alpha} = (\Delta_{B\lambda}, \Delta_{B\beta}, \Delta_{B\gamma}) \quad (1.18)$$

$$\Delta_{n\alpha} = (\Delta_{n\lambda}, \Delta_{n\beta}, \Delta_{n\gamma}) \quad (1.19)$$

它们间的差值 $\delta_\alpha = \Delta_{B\alpha} - \Delta_{n\alpha}$ 确定了角度 $\alpha = (\lambda, \beta, \gamma)$ 的公差：

$$\delta_\alpha = (\delta_\lambda, \delta_\beta, \delta_\gamma) \quad (1.20)$$

在机器制造的实践中，通常说明一个表面相对于另一个表面的偏转偏差，不用偏差角，而用这些角的正切。按照这个道理，对于相对偏转偏差引用了下列符号：

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\lambda} &= \operatorname{tg}(\Delta\lambda) \\ \Delta_{\beta} &= \operatorname{tg}(\Delta\beta) \\ \Delta_{\gamma} &= \operatorname{tg}(\Delta\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\lambda} &= \operatorname{tg}(\delta\lambda) \\ \delta_{\beta} &= \operatorname{tg}(\delta\beta) \\ \delta_{\gamma} &= \operatorname{tg}(\delta\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

在空间关系的几何解释中, Δ_{λ} , Δ_{β} , Δ_{γ} 是辅助基准在 $OXYZ$ 系统的坐标平面中的相对偏转偏差; 而 δ_{λ} , δ_{β} , δ_{γ} 是约束这些偏差的公差。偏差 Δ_{α} 的存在表示 $oxyz$ 系统在 $OXYZ$ 系统中占据的新角度位置。因此, 发生了相应的基准表面对置点间的距离偏差, 其值为:

$$\Delta_{x\alpha} = Z\Delta_{\beta} - \frac{Y\Delta_{\gamma}}{\sqrt{1 - \Delta_{\beta}^2}} \quad (1.23)$$

$$\Delta_{y\alpha} = Z\Delta_{\lambda} - \frac{X\Delta_{\gamma}}{\sqrt{1 - \Delta_{\lambda}^2}} \quad (1.24)$$

$$\Delta_{z\alpha} = Y\Delta_{\lambda} - \frac{X\Delta_{\beta}}{\sqrt{1 - \Delta_{\lambda}^2}} \quad (1.25)$$

式中 X 、 Y 、 Z ——零件表面上点的坐标; 符号《 π 》表示由表面的相对偏转决定的相应轴线方向上的尺寸偏差。

公式 (1.23)~(1.25) 指出, 绕 OY 和 OZ 两轴线的偏转误差影响 OX 轴线方向上的尺寸偏差; 绕 OX 和 OZ 轴线的偏转误差影响 OY 轴线方向上的尺寸偏差; 而表面相对于 OX 和 OY 轴线的偏转误差影响 OZ 轴线方向上的尺寸偏差。

考虑到偏差的平方数值 Δ_{λ}^2 , Δ_{β}^2 , Δ_{γ}^2 通常比 1 小几个数量级, 那么方程式 (1.23)~(1.25) 可以记成如下形式:

$$\Delta_{x\alpha} = Z\Delta_{\beta} - Y\Delta_{\gamma} \quad (1.26)$$

$$\Delta_{y\alpha} = Z\Delta_{\lambda} - X\Delta_{\gamma} \quad (1.27)$$

$$\Delta_{z\alpha} = Y\Delta_{\lambda} - X\Delta_{\beta} \quad (1.28)$$

所得到的方程式建立了距离偏差 $\Delta_{x\alpha}$, $\Delta_{y\alpha}$, $\Delta_{z\alpha}$ 和零件表面

相对偏转偏差 Δ_λ , Δ_β , Δ_γ 间的函数关系。方程式指出, 受相对偏转误差约束的尺寸偏差同时又取决于所研究点的坐标 X, Y, Z 值。各项前的负号表示当 $oxyz$ 系统按正方向偏转时, 有负的距离偏差。当各项的符号相同时, $\Delta_{X\pi}$, $\Delta_{Y\pi}$, $\Delta_{Z\pi}$ 有最大偏差。当 $oxyz$ 系统围绕相应轴线坐标偏转时, 在下述条件下有不同的符号:

对于 xoy 平面, 在 $(\Delta_\lambda, -\Delta_\beta)$ 和 $(-\Delta_\lambda, \Delta_\beta)$ 时;

对于 yoz 平面, 在 $(\Delta_\beta, -\Delta_\gamma)$ 和 $(-\Delta_\beta, \Delta_\gamma)$ 时;

对于 xoz 平面, 在 $(\Delta_\lambda, -\Delta_\gamma)$ 和 $(-\Delta_\lambda, \Delta_\gamma)$ 时。

我们把由零件表面几何形状误差决定的距离偏差作为列矩阵的元素

$$\Delta_{L\phi} = (\Delta_{X\phi}, \Delta_{Y\phi}, \Delta_{Z\phi}) \quad (1.29)$$

那么作为工件表面的相对距离、偏转和平面度函数的距离偏差, 用相应矩阵的合成来得到:

$$\Delta_L = \Delta_{Lc} + \Delta_{L\pi} + \Delta_{L\phi} \quad (1.30)$$

根据以上所得到的, 确定所研究矩阵元素值的关系, 公式 (1.30) 可写成如下的展开式:

$$\Delta_{LX} = \Delta_\lambda - \frac{Y \operatorname{tg}(\Delta_\gamma)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\Delta_\beta)}} + Z \operatorname{tg}(\Delta_\beta) + \Delta_{X\phi} \quad (1.31)$$

$$\Delta_{LY} = \Delta_\beta - \frac{X \operatorname{tg}(\Delta_\gamma)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\Delta_\lambda)}} + Z \operatorname{tg}(\Delta_\lambda) + \Delta_{Y\phi} \quad (1.32)$$

$$\Delta_{LZ} = \Delta_\gamma - \frac{X \operatorname{tg}(\Delta_\beta)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\Delta_\lambda)}} + Y \operatorname{tg}(\Delta_\lambda) + \Delta_{Z\phi} \quad (1.33)$$

为了简化计算, 可以假定使公差带的中点坐标作如下的转变, 即公差带的边界之一与公称尺寸相重合。在这种情况下, 相对偏转公差将从公称值按单向分布。

把由方程式 (1.15)、(1.16)、(1.18)、(1.19) 得出的允许偏差相应值代入公式 (1.31)~(1.33) 中。因此得到零件的基本定位表面和辅助定位表面对置点间距离的最大偏差。

$$\Delta_{\cdot k} = (\Delta_{\cdot Lx}, \Delta_{\cdot Ly}, \Delta_{\cdot Lz}) \quad (1.34)$$

$$\Delta_{\cdot L} = (\Delta_{\cdot Lx}, \Delta_{\cdot Ly}, \Delta_{\cdot Lz}) \quad (1.35)$$

矩阵 $\Delta_{\cdot L}$ 和 $\Delta_{\cdot L}$ 的相应元素差值

$$\delta_L = (\delta_{Lx}, \delta_{Ly}, \delta_{Lz}) \quad (1.36)$$

是定位表面对置点间距离的公差。

所以，可得到以下由尺寸精度、相对回转精度和零件表面几何形状精度之间关系所建立的表达式：

$$\delta_{Lx} = \delta_{\lambda} + \frac{Y\delta_{\gamma}}{\sqrt{1 + \delta_{\beta}^2}} + Z\delta_{\rho} + h_x \quad (1.37)$$

$$\delta_{Ly} = \delta_{\lambda} + \frac{X\delta_{\gamma}}{\sqrt{1 + \delta_{\beta}^2}} + Z\delta_{\lambda} + h_y \quad (1.38)$$

$$\delta_{Lz} = \delta_{\lambda} + \frac{X\delta_{\rho}}{\sqrt{1 + \delta_{\beta}^2}} + Y\delta_{\lambda} + h_z \quad (1.39)$$

因为相对偏转公差平方的数值 $\delta_{\lambda}^2, \delta_{\beta}^2, \delta_{\gamma}^2$ 比 1 小几个数量级，那么由三种形式偏差的关系所建立的公式 (1.37)~(1.39) 最后可以是如下形式：

$$\delta_{Lx} = \delta_{\lambda} + Y\delta_{\gamma} + Z\delta_{\rho} + h_x \quad (1.40)$$

$$\delta_{Ly} = \delta_{\lambda} + X\delta_{\gamma} + Z\delta_{\lambda} + h_y \quad (1.41)$$

$$\delta_{Lz} = \delta_{\lambda} + X\delta_{\rho} + Y\delta_{\lambda} + h_z \quad (1.42)$$

式中 $\delta_{\lambda}, \delta_{\beta}, \delta_{\gamma}$ ——基本基准坐标系 $OXYZ$ 中的辅助基准系统 $oxyz$ 原点的坐标公差； $\delta_{\lambda}, \delta_{\beta}, \delta_{\gamma}$ ——辅助基准相对偏转的公差； h_x, h_y, h_z ——表面形状（平面度）偏差的极限范围； X, Y, Z ——在主要定位表面上边缘点的坐标。

所得到的关系式 (1.40)~(1.42) 建立了用广义坐标描述的零件精度基本指标间的函数关系。利用这些公式可以解决尺寸公差、相对偏转和在各个坐标平面中的零件表面几何形状公差。

1.2 机器零件质量的获得

为了获得所需的精度，把工件加入到工艺系统（СПИД——

机床—夹具—刀具—工件系统)的运动链和尺寸链中。在这种情况下,加工所得到的尺寸和工件表面的相对偏转乃是工艺系统工艺尺寸链的封闭环。工件在机床上加工所得到的表面或表面的组合与被选择的工艺基准有一定的位置关系。故提出可把为工件在机床上加工所用的工艺基准组合作为 $OXYZ$ 坐标系。如果用类似的方法,把 $oxyz$ 系统与工件的被加工表面或被加工表面的组合相联系,那么加工得到的表面对于工艺基准的位置,可以像 $oxyz$ 坐标系在 $OXYZ$ 系统中的位置那样来确定。确定 $oxyz$ 坐标系在 $OXYZ$ 系统中位置的矩阵 $k_A = (A_A, B_A, C_A, \lambda_A, \beta_A, \gamma_A)$ 的各元素是工艺系统相应工艺尺寸链的封闭环。

所以在一般情况下,在所确定的机床工艺系统中有三个工艺尺寸链—— A 、 B 、 C (它们确定被加工表面在 X 、 Y 、 Z 坐标轴方向上的相对距离)和三个工艺尺寸链—— λ 、 β 、 γ (它们确定工件所得到的表面对于工艺基准的偏转)。

直接参与形成工件尺寸和表面偏转的机床零件及刀具的尺寸和表面相对偏转是工艺系统工艺尺寸链的组成环。机床的各个零件和部件在系统中的定位是通过它们的基本基准,即通过在它们上面布置了约束零件或部件六个自由度的支承点的表面来实现。与该零件相连接的其它零件或部件的位置由辅助基准来确定,辅助基准用已规定的方式确定相对基本基准的坐标。如果把零件的基本和辅助基准作为被确定的坐标系 $OXYZ$ 和 $oxyz$,那么把与基础零件 q 连接的被连接零件 i 的安装可以认为是两个坐标系相重合,即使被连接零件的基本基准坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$ 与基础零件的辅助基准坐标系 $o_qx_qy_qz_q$ 相重合。

安装阶段尺寸关系的形式 在将工件放到工艺系统的运动链和尺寸链中时,必须保证工件相对机床或夹具基准有必要的位置精度。为此需将工件以一定的方式在机床工作台上或夹具中定位。确定工件在加工过程中位置的一组工艺基准形成了工艺基准坐标系 $OXYZ$ 。在这种情况下,加工所得到的工件表面是用已确定的方式相对这个系统测量坐标的。

机床工作台或夹具的表面（它们使工件在工艺系统中获得所需的精度）组成了 $oxyz$ 坐标系的一组基准。

在没有安装误差时，工件的工艺基准坐标系完全同与夹具或机床基准的工作表面相联系的 $oxyz$ 坐标系重合。如果有安装误差，那么， $OXYZ$ 系统相对于 $oxyz$ 系统发生位置变化。原点 O 在相应的 ox , oy , oz 轴方向上位移的三个坐标 (a_y, b_y, c_y) 和 $OXYZ$ 系统在 $oxyz$ 系统中的三个偏转角 $(\lambda_y, \beta_y, \gamma_y)$ 确定了 $OXYZ$ 系统在 $oxyz$ 系统中的位置。

平行移动的坐标和相对偏转角构成了安装误差的列矩阵，

$$\omega_y = (a_y, b_y, c_y, \lambda_y, \beta_y, \gamma_y) \quad (1.43)$$

知道了矩阵式 (1.43) 的元素，就可以计算任何表面或被安装工件的一组基准相对于机床和夹具基准的位置（图1.2）。

在没有安装误差时， $\omega = 0$ ，主孔和与它联系的坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 将相对于机床基准占据由辅助基准矩阵 $k = (A_i, B_i, C_i, \lambda_i, \beta_i, \gamma_i)$ 的元素所确定的位置。

在有安装误差时， $\omega \neq 0$ ，孔和端面将在机床基准的坐标系 $oxyz$ 中移动到另一个位置，即 $k' = (A', B', C', \lambda', \beta', \gamma')$ 。考虑到安装误差，主孔位置可以按下式确定：

$$k' = k_y + \Pi' k \quad (1.44)$$

式中， k_y 是安装向量； Π' ——方形变换矩阵。

由 $oxyz$ 和 $OXYZ$ 系统坐标轴间夹角的余弦所提供的矩阵元素用角度 $\lambda_y, \beta_y, \gamma_y$ 的三角函数来计算。对于用相应的坐标系描述的零件表面或表面组合所需位置精度的偏差，由两个矩阵元素的差值来确定：

$$\omega_y = k' - k \quad (1.45)$$

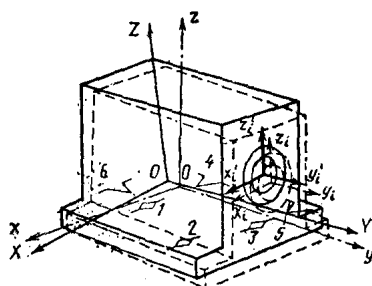


图1.2 在机床工作台上的箱体零件存在安装误差时，坐标系的误差图

将展开后的向量矩阵 k 和 k' 的值代到公式 (1.45) 中, 得到

$$\begin{pmatrix} a_{yi} \\ b_{yi} \\ c_{yi} \\ \dots \\ \lambda_{yi} \\ \beta_{yi} \\ \gamma_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \\ \dots \\ \lambda_y \\ \beta_y \\ \gamma_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \\ & & & 0 \\ & & & & l_1 & l_2 & l_3 \\ & & 0 & & m_1 & m_2 & m_3 \\ & & & & n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ B_i \\ \dots \\ \lambda_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ B_i \\ \dots \\ \lambda_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{pmatrix}$$

工件表面某设定点 N 对于机床基准的位置, 在有安装误差时, 可由下式确定:

$$\begin{pmatrix} x'_N \\ y'_N \\ z'_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \end{pmatrix} \quad (1.46)$$

式中 X_N, Y_N, Z_N ——在被安装工件的工艺基准系统中 N 点的坐标。

N 点的坐标相对所需精度的偏差等于

$$\begin{pmatrix} \Delta x_y \\ \Delta y_y \\ \Delta z_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y \\ b_y \\ c_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1.47)$$

被安装工件的表面或某设定点的位置偏差 ω_y 是所研究的安装误差, 它是在工件的工艺基准系统中 ω_y 值和所研究点或表面坐标的函数。

图 1.3 是带有可换刀头的半自动车床刀架。所表示的公式可以用来计算取决于车刀安装误差的切削刃位置偏差和切削几何形状的变化。

为了确定工件位置所需

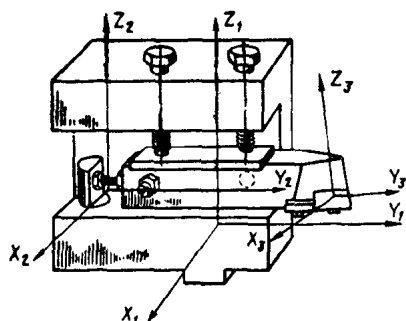


图1.3 可换刀头对刀架的安装图