

项目 3

基于三坐标测量技术的数据采集



项目目的

- (1) 使学生了解三坐标测量技术的相关概念；
- (2) 掌握三坐标测量机的基本测量设置、操作步骤及测量数据的处理；
- (3) 为后续建模项目提供必要的点云测量数据；
- (4) 培养学生独立分析和解决实际问题的实践能力；
- (5) 培养学生组织协调能力和团队合作能力；
- (6) 培养学生独立思考和创新设计的能力。



项目内容

- (1) 三坐标测量机的测量原理及组成结构；
- (2) 三坐标测量机基础测量方法及操作步骤；
- (3) 按实训的教学要求,熟练操作三坐标测量机对肥皂盒进行测量；
- (4) 根据测量的点云数据完成肥皂盒的逆向造型设计。



课时分配(参考)

本项目共 5 个单元,课时 20 学时。

3.1 三坐标测量机简介

3.1.1 三坐标测量机的历史与发展

三坐标测量机的发展可分为三代。

第一代:世界上第一台测量机是英国的 Ferranti 公司于 1959 年研制成功的,当时测量方式是测头接触工作后,靠脚踏板来记录当前坐标值,然后使用计算器来计算元素间的位置关系。1964 年,瑞士 SIP 公司开始使用软件来计算两点间的距离,开始了利用软件进行测量数据计算的时代。70 年代初,德国 Zeiss 公司使用计算机辅助工件坐标系代替机械对准,从此测量机具备了对工件基本几何元素尺寸、形位公差的检测功能。

第二代:随着计算机的飞速发展,测量机技术进入了 CNC 数字控制机床时代,完成了复杂机械零件的测量和空间自由曲线曲面的测量,测量模式增加和完善了自学习功能,

改善了人机界面,使用专门测量语言,提高了测量程序效率。

第三代:从 20 世纪 90 年代开始,随着工业制造行业向集成化、柔性化和信息化发展,产品的设计、制造和检测趋向一体化,这就对作为检测设备的三坐标测量机提出了更高的要求,从而提出了第三代测量机的概念。其特点:①具有与外界设备通信的功能;②具有与 CAD 系统直接对话的标准数据协议格式;③硬件电路趋于集成化,并以计算机扩展卡的形式,成为计算机的大型外部设备。

美国的 Brown&Sharp 公司,先后兼并德国 Letiz 公司和中国青岛前哨英柯发,成为第一集团,其代表产品为: Xcel、Scirocco、PMM 等。德国 Zeiss 公司合并了 Mauser 以及美国 Numerex 公司,成为第二集团,代表产品为: VAST、C400、Eclipse 等。第三集团为日本三丰,代表产品为: Bright、KN-810 等。

国内三坐标测量机研制工作始于 20 世纪 70 年代中期,并由北京航空精密机械研究所率先推出第一台商品化 CMM,1978 年在西飞 172 厂、哈飞公司先后投入使用;80 年代中国开始引进国外技术,并对国外先进技术消化吸收。到目前为止,国内测量机生产基地有:北京航空精密机械研究所、成都工具研究所、北京立科等。

3.1.2 三坐标测量机的测量原理

三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine,CMM)是典型的接触式三维数据采集设备,是逆向工程应用初期样件表面三维数据采集的主要手段。

简单地说,三坐标测量机就是在三个相互垂直的方向上有导向机构、测长原件、数显装置,有一个能够放置工件的工作台(大型和巨型不一定有),测头可以以手动或机动方式轻快地移动到被测点上,由读数设备和数显装置把测点的坐标值显示出来的一种测量设备。显然,这是最简单、最原始的测量机。有了这种测量机后,在测量容积里任意一点的坐标值都可通过读数装置和数显装置显示出来,如图 3-1 所示。

测量机的采点发讯装置是测头,在沿 X、Y、Z 三个轴的方向装有光栅尺和读数头。其测量过程就是当测头接触工件发出采点信号时,由控制系统去采集当前机床三轴坐标相对于机床原点的坐标值,再由计算机系统数据进行处理和输出。因此测量机可以用来测量直接尺寸,也可以获得间接尺寸和形位公差及各种相关关系,也可以实现全面扫描和一定的数据处理功能,可以为加工提供数据并处理加工测量结果。

在进行逐点式扫描测量时,将探头在横向以等速或等间距逐点移动,再以等间隔量取工件在 Z 轴的坐标。但当工件轮廓有明显起伏变化时,需要增加测量点来提高分辨率,最简单的方式是取 $(\Delta X + \Delta Z)$ 为常数, ΔX 和 ΔZ 分别是 X 轴和 Z 轴的分辨率。当 ΔZ 变大时, ΔX 应变小,测量点将更加密集。即当工件斜率变大时,测量速度减慢。

应用 CMM 进行三维点数据获取时,测量人员可用人工规划测量路径的方式逐点测



图 3-1 三坐标测量机



图 3-2 CMM 测量的点云

量,也可以用 CNN 做辅助,沿着曲面的外形接触被测样件获取数据。

三坐标测量机的优点是精度高、噪声低、测量结果重复性好等;其缺点是对物体细微特征的测量有限制(图 3-2),由于测头直接和样件接触,不适合于对易碎、软性材料的物体表面进行测量,并且探头具有一定的直径,摩擦力和弹性变形容易引起被测物体的变形而产生测量误差,测量数据需要进行测头

半径补偿。如果工件形状复杂且有突变,要将工件分成不同的区域,使用不同的参数进行扫描,比较耗时。该设备可广泛用于工业中的首件检测、质量检验、夹具检验^[44]、生产过程质量控制以及逆向工程。

3.1.3 三坐标测量机的组成和结构

尽管三坐标测量机种类繁多,结构形式、机器性能各异,但所有三坐标测量机的主要工作机理均是将被测量与标准量比较,经计算处理后得到三维的测量数据。因此,三坐标测量机通常具有三个方向的标准器(标尺),在控制与驱动系统的指挥驱动下,使三维测头系统能对被测物体沿具有标尺的导轨作的相对运动,从而实现检测或扫描,并将测量数据处理后输出。

由以上工作机理得知,三坐标测量机均由主机床身(含具有标尺的导轨)、测头系统和控制与驱动系统三大部分组成,控制系统又包括计算机系统和电控柜,如图 3-3 所示。

1. 主机

主机能放置被测物体并使测头系统能平稳地沿导轨运动。主机主要由框架结构的床身、标尺系统、导轨、机构运动的传动装置、平衡部件、工作台及附件组成,如图 3-4 所示。

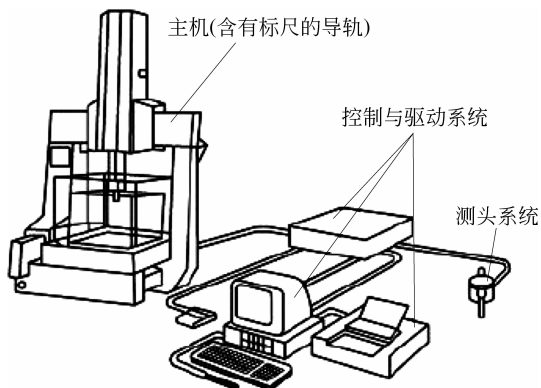


图 3-3 三坐标测量机的构成

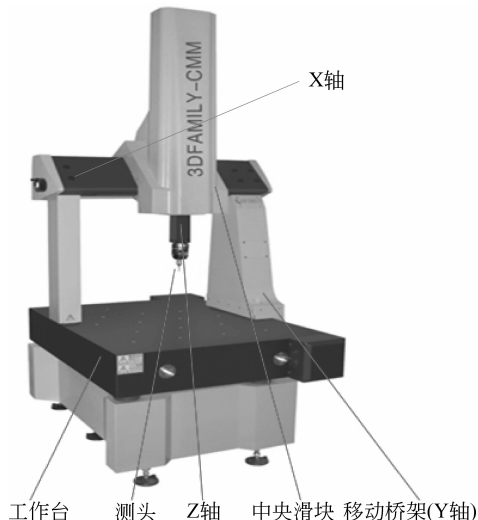


图 3-4 三坐标测量机主机的构成

2. 测头系统

测头系统即三维测量传感器,它可在三个方向上感受瞄准信号和微小位移,以实现瞄准和测微两项功能。测头部分主要用于检测被测物体,采集数据。为了便于检测物体,测头底座部分可自由旋转。测头系统主要由测头底座、加长杆、传感器和探针组成(图3-5)。



图 3-5 三坐标测量机的测头

3. 控制与驱动系统

控制与驱动系统是测量机的核心,主要用于控制测量机的运动,并对测头系统采集的数据进行处理以及实现数据和图形的输出。控制与驱动系统主要由电路控制部分、计算机硬件部分、测量机软件及打印与绘图装置等组成。

测量机种类繁多,其分类方式也有多种。

- 按精度:生产型、精密型、计量型。
- 按采点方式:点位采样型、连续采样型。
- 按运动形式:机动型和手动型。
- 按测头接触方式:接触式、非接触式等。
- 按机械结构:活动桥式、固定桥式、高架桥式、水平臂式、关节臂式等(图3-6)。

3.1.4 三坐标测量机在逆向工程中的作用

三坐标测量机的出现是标志计量仪器从古典的手动方式向现代化自动测量技术过渡的一个里程碑。主要表现在以下方面。

(1) 解决了复杂曲面轮廓难以常规测量的问题,并逐步成为逆向工程的重要手段。如对叶片、齿轮、汽车和飞机的外形轮廓及复杂箱体的孔径和孔距的测量等。

(2) 提高了测量精度。目前高精度的三坐标测量机单轴精度可达 $1\mu\text{m}$,三维空间精度可达 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。

(3) 三坐标测量机与数控机床及加工中心配套,通过在线测量的工作方式成为柔性制造系统的有机组成部分。

(4) 三坐标测量机提高了测量效率,促使产品检测的自动化程度不断提高,促进了三维测量技术的进步,大大提高了测量效率,强化了逆向工程数字建模的技术功能。

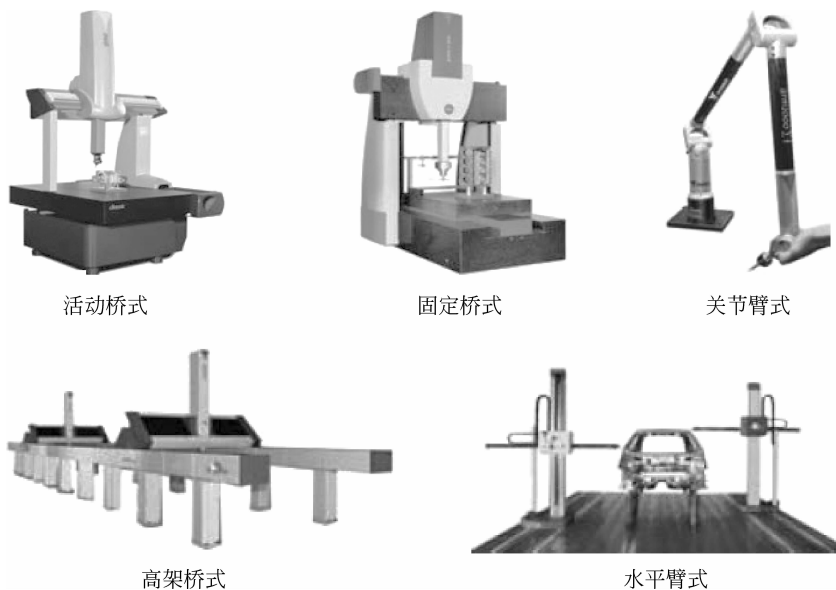


图 3-6 按机械结构形式分类的三坐标测量机

3.2 三坐标测量机基础测量技能实训

3.2.1 测量机操作盒

TU01 操作盒是机动坐标测量的操作控制单元,如图 3-7 所示,其中有 4 个键功能没有设定。其他各应用键功能如下。



图 3-7 TU01 操作盒

(1) 速度调节旋钮: 调节采点速度大小和程序执行时速度快慢。

(2) 应急旋钮: 用于紧急停止,恢复时需旋钮弹起。

(3) 左右使能按钮: 所有操作必须在此键按下之后才能进行。

(4) 采点按钮: 按下时红灯亮,测量机以低速运动进行采点。

(5) 碰撞恢复按钮: 用于碰撞后恢复测量机的运动。

(6) 微动按钮: 用于控制测头以微米级低速移动。

(7) 定位按钮: 用于在自学习时采进定位点。

(8) 方向控制操作杆: 控制 X、Y、Z 三个方向的运动。其大小由扳动的角度决定。

使用注意事项如下。

(1) 掌握运动方向,避免误操作,尤其是 Z 轴上下方向。

Z 轴的运动方向用右手法则判断: 若四指握拳方向为 Z 轴运动控制旋钮方向,则大拇指竖起时的指向即为 Z 轴运动方向。

(2) 体会并掌握控制速度大小与扳动角度的关系,尤其注意 Z 轴向下运动较快,避免测头及 Z 轴碰撞。

(3) 机器停止运动时,注意将采点状态开关打开,防止发生不必要的危险。

(4) 碰撞后恢复时,扳动角度一定要小,以免出乎意料地向相反方向碰撞。

3.2.2 测头管理

1. 测头介绍

(1) TF6 测头

TF6 测头包括测尖、测杆、发信装置和安装座。测杆偏移时发信,同时有声光电信号。为方便测量,可配星形测尖。

(2) PH9/10 测头

PH9/10 系统测头包括测尖、TP2 发信装置、测头体、安装座以及控制盒。PH9/10 测头体含两个转台和三个电机,转台分别用于测头的俯仰和旋转运动。三个电机分别用于两个方向的驱动和锁紧。俯仰和旋转角分别以 A 角(PITCH)和 B 角(ROLL)表示,角度间隔 7.5° 。转动时角度是 7.5 的倍数。A 角范围为 $0^\circ \sim 105^\circ$, B 角范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

测头如图 3-8 所示。

2. 测头约定

为统一使用,测头安装座及测尖都有固定编号。

安装头编号(HEAD NUMBER)是固定的,沿 $-Z$ 方向的安装头编号为 1,沿 $+Y$ 方向的安装头编号为 2,逆时针方向依次为 3,4,5。

测尖编号(TIP NUMBER),安装头为 $-Z$ 方向时的测尖编号是最常用的,需要牢记,沿 $-Z$ 方向的测尖编号为 1,沿 $+X$ 方向的测尖编号为 2,逆时针方向依次为 3,4,5。安装头在其他方向时测尖编号由表格查出。

在编程时会用到 PROBE(Headnum, Tipnum) 命令来指定测头,其参数对 TF6 和 PH9/10 是不同的。对于 TF6 来说,Headnum 和 Tipnum 分别指安装头编号和测尖编号,其数值为 $1 \sim 5$ 。对于 PH9/10 来说,Headnum 和 Tipnum 分别指位置编号和测尖编号,其数值为 $1 \sim 30$ 和 $1 \sim 5$ (一般为 1,星形测尖可以到 5)。

3. 标定及校正

在对工件进行实际检测之前,首先要对测量过程中用到的探针进行校准。因为对于不同尺寸的测量,需要沿不同方向进行。系统记录的是探针中心的坐标,而不是接触点的坐标。为了获得接触点的坐标,必须对探针半径进行补偿,因此,首先必须对探针进行校准,一般使用校准球来校准探针。校准球是一个已知直径的标准球。校准探针的过程实际上就是测量这个已知标准球直径的过程。该球的测量值等于校准球的直径加探针的直

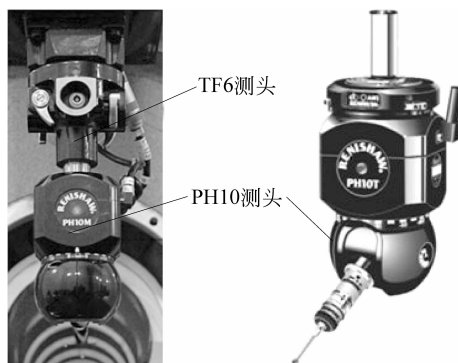


图 3-8 测头

径,这样就可以确定探针的半径。系统用这个值就可以对测量结果进行补偿,具体操作步骤如下:

- (1) 将探针正确地安装在三坐标测量机的主轴上;
- (2) 将探针在工件表面上移动,看是否均能测到,检查探针是否清洁,一旦探针的位置发生改变,就必须重新校准;
- (3) 将校准球装在工作台上,要确保不用移动校准球,并在球上打点,测量点个数最少为 5 个;
- (4) 测完给定的点数后,就可以由测量得到校准球的位置、直径、形状偏差,由此就可以得到探针的半径值。

测头每次安装都要进行标定(Calibration)及校正(Qualification)才能使用,原因在于其本身不知道测尖的具体位置及测头半径,也就无法确定测量点相对于原点的坐标。

标定及校正都是对标准球进行的。标定过程结束,标定结果自动保存。校正是针对标定的测头进行的。它得到的是当前测头相对标定测头的偏置。因此,标定的测头是一个公共基准,在所有的标定校正过程中,标定的只能是一个测尖,校正的是其他测尖。

有时无法用一个标准球校正全部测尖,可以使用其他的标准球 2 或 3。此时可以选定任意已校正测尖对标准球 2 或 3 进行标定,再对标准球 1 无法校正的其余测尖进行校正。

标定的目的有三个。

- (1) 获得标准球球心的坐标 (X, Y, Z) 。
- (2) 获得要校正测尖的公共基准。
- (3) 测尖的动态半径 R , 动态半径的概念和测头的实际静态半径不同。

校正的目的有两个。

- (1) 获得所测的球心的相对位置 (X, Y, Z) 。
- (2) 测尖的动态半径 R 。

测量过程所有要用到的探针都要进行校准,而且一旦探针改变位置,或者取下后再次使用时,要重新进行校准。因此,非接触式测量在探针的校准方面要用去大量的时间。为解决这一问题,有的三坐标测量机上配有测头库和测头自动交换装置。测头库中的测头经过一次校准后可重复交换使用,而无须重新校准。

4. 测尖的保存、调用和删除

当一组测头标定、校正后,可以将其数据以文件的形式保存在磁盘上,只要保证其不被碰撞或卸掉,下次开机后,可以直接调用上次标定、校正后保存在磁盘上的数据,直接进入测量状态,从而省去了标定、校正的操作。当一组测头中的某个测尖不再需要时,可以单击删除按钮选择相应的测尖。

3.2.3 测量坐标系

在测量零件之前,必须建立精确的测量坐标系,便于零件测量及后续的数据处理。

三坐标测量机测量与传统测量方法的主要区别在于测量空间大、精度高、通用性强和测量效率高。测量效率高主要来源于两个方面:第一是配备的测量软件能够对数据进行

自动处理;第二是待测零件易于安装定位,测量软件可以辅助自动找正,而无须向传统测量仪器那样需要找正。

工件在工作台上的搁置方式一般有两种:一种是通过专用夹具或自动装卸装置将工件放在工作台上的某一固定位置。这样,通过一次工件找正,在以后测量同批工件时由于工件位置基本上是确定的,无须再对工件进行找正,就可以直接进行测量;另一种是通过肉眼的观察直接将工件放在工作台的某一合适位置,这种情况下,每测一个工件都必须首先在工作台上对其进行找正。

为便于测量找正和测量数据的转换处理,在三坐标测量软件中一般采用三个坐标系,分别为机器坐标系、基准坐标系和工件坐标系。

1. 机器坐标系

以机器开机时测头所在的位置为原点,以 X、Y、Z 三个导轨方向为坐标轴所构成的直角坐标系,称为机器坐标系。

2. 基准坐标系

基准坐标系又称绝对坐标系,它以三坐标测量机工作台上某一固定点为原点,以通过该原点且平行 X、Y、Z 三个导轨方向为坐标轴所构成的直角坐标系,称为基准坐标系。当更换测头后,甚至在关机重新启动的情况下,仍能根据基准坐标系重新恢复各要素之间的相互位置关系。基准坐标系通常是通过测量一个固定在工作台上的标准球,并以它的球心为原点建立的坐标系。

3. 工件坐标系

建立在被测物体上的坐标系称为工件坐标系,工件坐标系便于直接测量处理工件的被测数据、尺寸。三坐标测量机有其本身的机器坐标系。在进行检测规划时,检测点数量及其分布的确定,以及检测路径的生成等,都是在 CAD 中工件坐标系下进行的。因此,在进行实际检测之前,首先要确定工件坐标系在三坐标测量机机器坐标系中的位置关系,即首先要三坐标测量机机器坐标系中对工件进行找正,通常采用 6 点找正法,即 3-2-1 方法对工件找正。首先,通过在指定平面测量三点(1,2,3)或三点以上的点校准基准面;其次,通过测量两点(4,5)或两点以上的点来校准基准轴;最后,再测一点(6)来计算原点。在以上 3 步操作中,检测点位置的确定都是依据工件坐标系来选择的。三坐标测量机软件允许测量中建立多个工件坐标系。

建立工件坐标系的具体步骤如下。

(1) 平面找正:确定测量基准平面。任何测量工作的第一步,都需要通过测量零件上的一个平面来找正被测零件,保证机器坐标系的 Z 轴总是垂直于该基准平面。若零件加工时是采用底平面作为加工基准的,可直接找正该底平面作为测量基准平面。注意:平面找正时必须至少取同一平面上的三个点,对于三个以上的点,系统会计算平均值确定找正平面。

(2) 轴线找正:确定已找正平面上轴线的相位。如在精加工表面(与已找正平面平行)探测两个点,使其连成一条直线或通过两个孔中心连成一条直线后,将机器坐标系

的一轴旋至与该直线重合,从而确定工件坐标系的 XOY 平面。取垂直该 XOY 平面的任一矢径为 Z 轴,并取背离测点方向为 Z 轴正向,至此工件坐标系的三轴方向均已确定。

(3) 原点找正: 确定测量系统的基准原点。取被测零件上的任一点为工件坐标系 Z 轴的射线点,由射线点发出的射线与找正平面相交所得的点为工件坐标系的原点,相对该原点即确定 X 、 Y 轴的正向。

3.2.4 元素的测量和构造

1. 基本元素的测量

基本元素的测量是使用三坐标测量机的一个基础,必须牢固掌握。其中的难点在于:

(1) 点、线的测量及补偿。

(2) 三阶平面的测量。

测量元素的构造见表 3-1。

表 3-1 测量元素的构造

元素	采点方法	获得要素	备注
点	1 点	坐标 $X, Y, Z; PR, PA, DS$	注意补偿方向
线	3 点	贴合点 $X, Y, Z; CX, CY, CZ$	注意补偿方向
面	4 点	贴合点 X, Y, Z ; 法矢量 CX, CY, CZ	
圆	4 点	圆心 $X, Y, Z; DM; CX, CY, CZ$	二维元素, 需要正确投影面
球	5 点	球心 X, Y, Z 及 DM	
圆柱	8 点(4+4)	贴合点 X, Y, Z, CX, CY, CZ, DM	轴线方向的应用
圆锥	7 点(3+4)	锥顶 X, Y, Z, CX, CY, CZ, ANG	轴线方向的应用
二阶柱	8 点(4+4)	$X, Y, Z, DM, DM2, CX, CY, CZ$	
圆槽	6 点(顺序)	中心 $X, Y, Z, CX, CY, CZ, DM, DM2$	二维元素, 注意测量点顺序
方槽	8 点(顺序)	中心 $X, Y, Z, CX, CY, CZ, DM, DM2$	二维元素, 注意测量点顺序
三阶面	3 点	贴合点 X, Y, Z , 法矢 CX, CY, CZ	输入距离与测点顺序的对应
空间圆	8 点(4+4)	特征点 X, Y, Z 及 CX, CY, CZ, DM	先测投影面
椭圆	6 点(顺序)	中心 X, Y, Z 及 $DM, DM2, CX, CY, CZ$	二维元素, 需要正确投影面
抛物面	7 点(3+4)	焦点 X, Y, Z 和 $DS=F$ 及 CZ, CY, CZ	测两个截面
圆环	12 点(4+4+4)	中心 X, Y, Z 和 $CX, CY, CZ, DM, DM2$	注意测量采点的两种方法

2. 点的测量

测点一般用于建坐标系,或测量沿某个轴线方向的长度。其点位所处的平面一般垂直于某一个坐标轴。手动采点后的补偿方向一般是沿着与采点方向最接近的坐标轴的方向进行的。这是隐含的补偿方向,当没有给定补偿方向的时候,机器自动采用这种方法补偿。

当点位处于不垂直坐标轴方向的斜平面上或曲面上时,要得到点的真正位置,就要用补偿向量。补偿向量时测量点法矢量的反向量。因此要准确知道一个点的位置,其位置上的法矢必须预先知道,如图 3-9 所示。

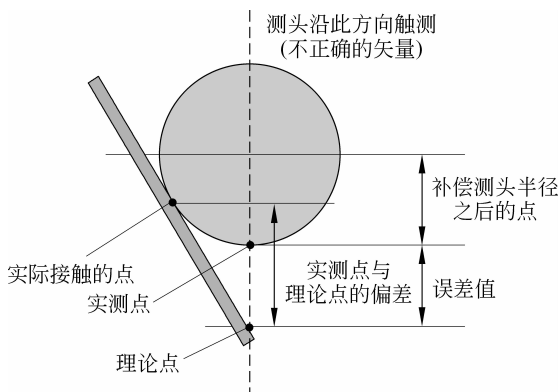


图 3-9 测量点法矢量

机器对点的补偿在不同的情况下是不同的。之所以必须进行补偿才能得到点的准确坐标,是因为测头都有半径数值。

关于点的测量的补偿,应该明确:

(1) 如果未设定补偿向量,而测量方向与某一坐标轴平行,则只有沿着采样方向的坐标能够得以正确补偿。这个隐含补偿方向,机器自动判断并补偿。如沿着+X方向测量,则补偿向量为(1,0,0)。

(2) 如果给出补偿向量,则点的三个坐标都得到正确补偿。当然这种情况台肩是倾斜的。

(3) 自动执行程序时,如果未给出补偿向量,则是按定位点到测量点的连线方向进行补偿,这样经常导致测量结果有0.1~0.3mm的误差。所以自动测量点的坐标时,更应注意给定补偿向量。

3. 线的测量

测线一般用于建坐标轴。在测量直线时有两种补偿方法。一般情况下按投影面进行补偿。在测量屏幕上选出测量线所在的平面,如X-Y平面等,测量之后系统会沿着平面法线方向进行补偿。这种补偿方法是选取与所选投影平面平行且与直线本身垂直的方向。

当线处于斜平面内的时候,其补偿要用到补偿向量。补偿向量的方向是平面法矢的反矢量。要补偿一条线,其斜面法矢必须预先设定。

4. 与坐标轴有关元素的测量

在测量圆、椭圆、圆槽、方槽时,由于这些元素属于平面元素,其测量必须在其投影平面内进行才能得到正确尺寸。其测量结果CX、CY、CZ是沿轴线的,尺寸计算也是沿着垂直轴线方向进行的。如第一轴,其方向垂直于元素的投影面。测量三阶平面时,要输入距离,其正负判断方法为:点到平面的方向与测量方向一致时为正,反之为负。

5. 其他元素的测量

除了点、线、圆、椭圆、圆槽、方槽之外的其他元素都是空间基本几何元素,在测量时不