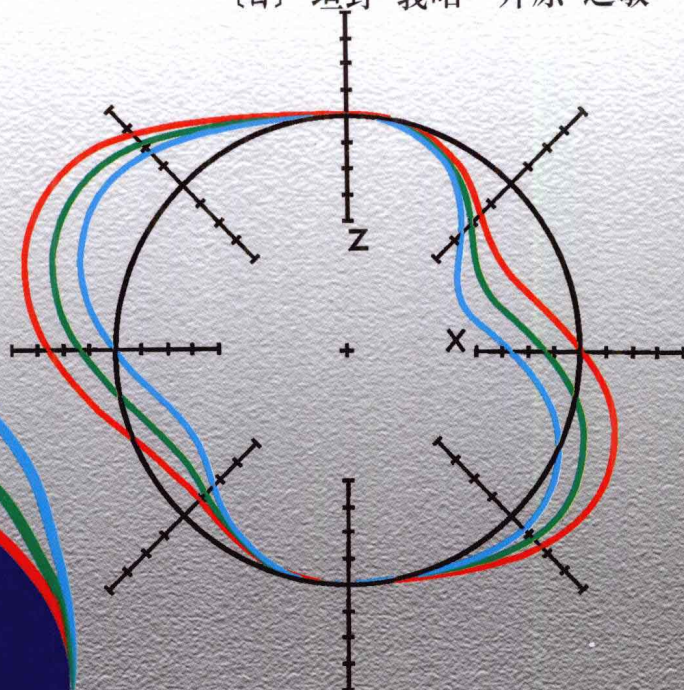


DBB法による
NC工作機械の精度評価法

基于球杆仪的 数控机床精度评价方法

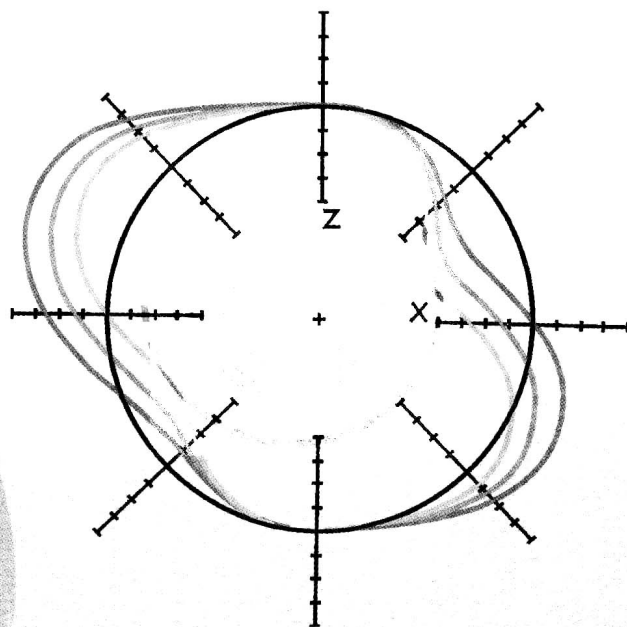
〔日〕 垣野 義昭 井原 之敏 篠原 章翁 著
唐英 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

基于球杆仪的 数控机床精度评价方法

[日] 垣野 義昭 井原 之敏 篠原 章翁 著
唐英 译



TG659
Y817



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书原著由京都大学垣野义昭教授等编著。其提出的基于球杆法运动精度检测方法已被ISO230-4采用,成为数控加工中心精度检测方法之一。本方法在中国机床行业得到广泛使用。

除介绍了球杆法运动精度测量方法的基本原理和实施方法之外,本书还介绍了大量的机床试验实例。

垣野 義昭・井原 之敏・篠原 章翁

株式会社リアライズ社

Copyright©1990

陕西省版权局合同登记号:25-2010-158号

图书在版编目(CIP)数据

基于球杆仪的数控机床精度评价方法/(日)垣野 義昭,井原 之敏,篠原 章翁著;唐英译. —西安:西安交通大学出版社,2011.4

ISBN 978-7-5605-3891-4

I. ①基… II. ①垣… ②井… ③篠… ④唐…
III. ①数控机床-精度-评价 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第051759号

书 名	基于球杆仪的数控机床精度评价方法
著 者	〔日〕垣野 義昭 井原 之敏 篠原 章翁
译 者	唐 英
责任编辑	杨 璠

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 西安新华印刷厂

开 本	727mm×960mm	1/16	印张	10.625	字数	193千字
版次	2011年4月第1版		2011年4月第1次印刷			
书 号	ISBN 978-7-5605-3891-4/TG·38					
定 价	29.00元					

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

致中文读者

本书的日本版于 1990 年先由 Realize 出版社出版,读者主要是日本国内的机床制造厂家及用户。书中所介绍的“基于球杆仪的数控机床精度评价方法”非常有效,在广大读者中得到了好评。继而经 HEIDENHAIN 公司的介绍,本书的德译版和英译版于 1993 年由 Hanser 出版社出版。之后,本书中提出的双球杆仪法(DBB 法)被 ISO230-4 采纳,成为加工中心精度检验的方法之一,在世界范围内得到了广泛使用,本书也被指定为其重要的参考书目。

本书是京都大学的三位研究人员进行机床运动精度和机械结构相关研究的学术成果。在机床生产厂家的大力支持下,通过对约 150 台各种不同结构数控机床的测量数据进行分析整理,构成了本书的主要内容。DBB 法原理与结构简单明了,因而能获得高精度且可靠的测量结果和分析结果。而且,通过对 DBB 法测得的运动误差轨迹进行分析,能够对机床存在的问题进行合理诊断,从而采取适当的改进措施。

本书所提出的 DBB 法是以加工中心为代表的由直角坐标系构成的数控机床进行精度诊断的有效方法。本书是日本机床生产厂家技术人员的必读之书,作为学习如何设计制造机床结构的教材使用也很实用。

近年来,中国机床生产量迅速增长,机床性能也正在显著提高。本书对于更进一步地提高机床性能以及提升技术人员的教育水平,作用显著。非常期待本书能够成为广大技术人员的必读之书。

垣野 義昭

2010 年 5 月

原推荐之言

第一次听说球杆仪(Double Ball Bar,简称 DBB)是在四年前。应用由京都大学垣野義昭先生提出的球杆仪法(简称 DBB 法)对本公司的加工中心进行运动精度检测,原本模糊的机床运动精度被清晰地展示出来,突然有种拨开迷雾见日明的感觉,非常震惊。虽然以前激光干涉测长仪等检测仪器测量的一维定位精度可达 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 已成共识,但二维和三维定位精度因苦于没有简单而精密的检测方法,只能通过对样件进行圆切削并测量其圆度的方法来评估。DBB 法的出现,使得以较短时间完成 $0.5\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 三维运动精度的测量成为了可能。

当我了解到该方法还可以用于误差原因诊断时就更为惊讶。最初也曾半信半疑,但经现场应用后发现,该方法的确帮助本公司找到了机床所存在的问题。大脑里随即冒出“这对机床厂家真是个威胁”的念头。这是因为,机床用户一旦经学习掌握了这种方法,自己就能够判断机床质量的优劣,也就能分出机床厂家水平的高低了。

正如书中绪论所述,我们这些从事机床制造的技术人员读此书甚觉头疼,但为了科学技术进步又必须积极面对和接受。本书中所写内容只是还在进一步飞跃发展的机床现状,如此而言,可以说本书对我们而言是勉力鼓舞之作,是机床工作相关技术人员的必读之书。

安田工业株式会社常务 德毛 滋明

序

随着现代工业技术的不断发展进步,数控机床在各个行业得到了广泛的应用,使得数控机床在大批量生产和使用过程中,迫切需要一种简单、方便、高效和低成本精度评价方法和精度检测装置。本书译者根据这种需要,将《基于球杆仪的数控机床精度评价方法》(DBB法)翻译过来奉献给读者,是件好事。

数控机床的精度基础主要由机床的几何精度(静态)、运动精度(动态)、其它精度(刚性、热变形、保持性)等决定,在实际使用中最直接和主要的指标有:定位精度、重复定位精度和系统分辨率。本书基于以上的精度基础,不仅介绍了DBB装置的使用方法、原理、精度评价、误差诊断等内容,还阐述了通过用DBB法对六种机床动态状况下误差数据的测量以及相应的误差矢量的转换,建立模型,提炼出误差轨迹,进而找到误差原因,并实施改进满足设计和使用要求的检测实例,确实可以让读者受益匪浅。

基于球杆仪的数控机床精度检测评价方法(DBB法)有以下的几大功能和优点:

① 能帮助制造厂商缩短机床研制周期,降低产品成本,提高机床竞争力。如用于设计开发阶段,对样机结构缺陷及误差产生各环节原因的分析,做到早发现、早排除。

② 能方便厂商自己对机床进行制造验收,保证每一台产品皆符合销售要求。

③ 有利于用户自己对机床进行验收和评价,及时准确地做出选择。

④ 可以帮助用户快速诊断和分析机床故障及问题所在,及时处理,以保证机床的正常运行。

⑤ 方便用户对机床的保养维护。用DBB法不定期对机床进行精度检测和预防性维护,能够防止大故障的产生。

另外,基于球杆仪的数控机床精度检测评价方法(DBB法)在诊断数控机床回转精度误差方面尚有不尽如人意的地方,敬请大家共同改进。

综上所述,该书讲的基于球杆仪的数控机床精度检测评价方法(DBB法)不仅是对制造厂家有利,也是对最终用户有很大帮助的机床精度评价方法,同时它也将以前只能在一维和二维空间中进行的测量方法拓展为在三维空间进行的检测方法成为可能,实为广大同业者及技术人员不可多得的有益之书。

“精度”是伴随精密制造发展的永恒主题,“精度”是秦川机床工具集团不懈的追求。愿此书在中国的出版能够为机床工具行业的发展尽一点力。

中国机床工具工业协会 轮值理事长

秦川机床工具集团 董事长

龙兴元

2010年9月3日

目 录

第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 运动误差的定义与圆弧插补试验法的原理	(4)
2.1 运动误差的定义	(4)
2.2 圆弧插补试验法及其进行误差原因诊断的原理	(8)
2.2.1 圆弧插补试验法	(9)
2.2.2 圆弧插补试验法进行误差原因诊断的原理	(11)
第 3 章 测量装置	(13)
3.1 DBB 装置的构成	(13)
3.2 DBB 装置的精度检验	(15)
3.3 数据处理系统	(20)
第 4 章 运动精度测量法与精度评价法	(23)
4.1 测量步骤	(23)
4.2 测量条件	(25)
4.3 精度评价项目与评价法	(26)
4.4 精度检验实例	(27)
4.5 运动精度轨迹与加工形状误差的对比	(31)
第 5 章 误差原因的诊断方法	(35)
5.1 误差原因分类与诊断方法概要	(35)
5.1.1 误差原因分类	(35)
5.1.2 DBB 诊断法概要	(38)
5.2 各种误差原因的轨迹模式	(39)
5.3 诊断步骤	(63)
第 6 章 检测实例	(69)
6.1 绪论	(69)
6.2 立式加工中心(V)	(69)
6.2.1 结构与特征	(69)
6.2.2 半闭环控制方式的数控机床	(70)

6.2.3 闭环控制方式的数控机床	(89)
6.3 卧式加工中心(H)	(93)
6.3.1 结构与特征	(93)
6.3.2 半闭环控制方式的数控机床	(95)
6.3.3 闭环控制方式的数控机床	(106)
6.4 龙门式加工中心(D)	(114)
6.4.1 结构与特征	(114)
6.4.2 半闭环控制方式的数控机床	(115)
6.4.3 闭环控制方式的数控机床	(122)
6.5 单柱卧式加工中心(B)	(125)
6.5.1 结构与特征	(125)
6.5.2 半闭环控制方式的数控机床	(126)
6.5.3 闭环控制方式的数控机床	(128)
6.6 电火花加工机床(E)	(130)
6.6.1 结构与特征	(130)
6.6.2 半闭环控制方式的数控机床	(131)
6.7 激光加工机(L)	(135)
6.7.1 结构与特征	(135)
6.7.2 半闭环控制方式的数控机床	(136)
第7章 结论	(140)
致谢	(141)
附录A 测量及调心程序	(142)
附录B 运动精度评价表的制作方法	(144)
附录C 诊断数据表的制作	(147)
附录D 轨迹模式一览图	(151)
附表1 精度评价表	(156)
附表2 诊断数据表	(157)
附表3 误差原因诊断结果一览表	
译者后记	
参考文献	

第 1 章 绪论

今天,数控机床不仅作为机械加工中最基本的生产设备而得以普及,而且为了适应工厂自动化的发展,达到提高加工精度、缩短交货期、降低成本等目的,数控机床的应用更加广泛。为了满足生产现场的各种不同要求,改善数控机床性能的需求不断增加。如何实现高效精密加工可谓其中最为迫切的要求。

影响数控机床加工精度和加工效率的因素很多,它们之间的相互关系如图 1-1 所示。需要注意的是,粗加工的场所,数控机床的加工精度和加工效率主要由切削颤振所对应的加工极限决定。

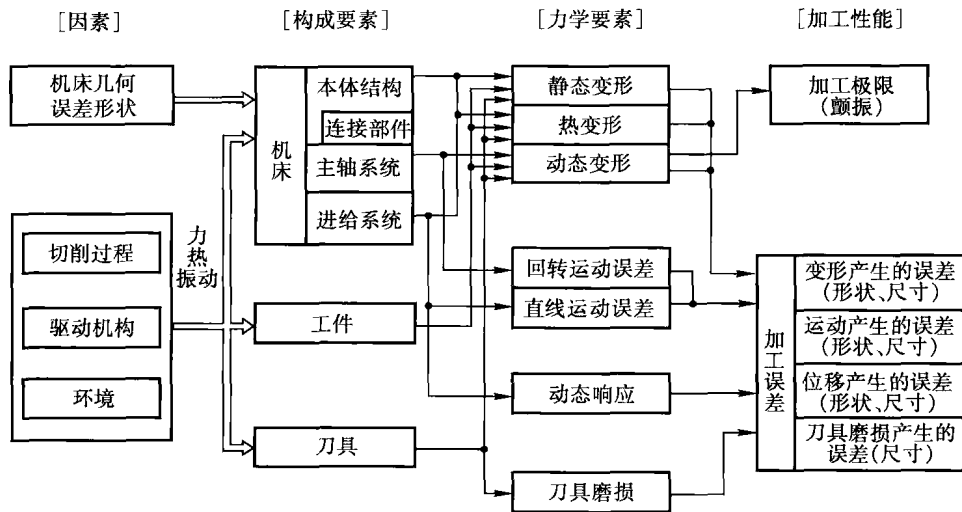


图 1-1 影响数控机床加工精度与加工极限的主要因素

如图 1-1 所示,在影响机床加工精度的因素中,起支配作用的是运动精度。如果机床存在运动误差,复映到加工形状上,导致加工误差增大。所以,了解掌握机床的运动精度对于精密加工而言不可或缺。如果构成机床设备的各零部件的尺寸、形状精度低,则机床的运动精度差。另外,安装与调整控制系统等对机床运动精度也有影响。

日本的国家标准(JIS)中,为了确定机床的运动精度,设置有被称为“直接试切试验(direct cutting test)”的加工精度检验项目,在数控铣床和加工中心等具有圆

弧插补功能的数控机床上,进行如下试验来检验其运动精度(JIS B 6333,B 6336);

- ① 直线切削检验尺寸精度和形状精度;
- ② 镗削加工检验定位精度;
- ③ 立铣刀切削外圆检验形状精度。

上述检验项目均是在机床装配调试结束后进行的,优点是能够综合了解机床在实际加工时的精度如何,以及刀具、工件及其装夹对加工精度的影响等。但在加工结束后,还必须利用三坐标测量机、圆度测量仪、表面粗糙度测量仪等仪器来测量工件精度,不仅消耗时间和人力,而且这些测量仪器的测量精度也是问题。即使这些测量仪器的测量精度很高,也无法判断究竟是机床的哪个部分导致了精度降低,因此无法就误差原因进行诊断。本书 2.2 节中将详细介绍直接试切试验法。

零件加工过程因自动化而实现了省工省力,在今天,减少装配、检验过程的人力和时间消耗等要求也日趋紧迫。过去一般使用激光干涉仪、自动准直仪、块规、直角定规、直规等仪器设备来检验机床精度^[1-8]。存在的问题是,操作上述仪器设备需要熟练的技术人员,进行精度检验耗时很长,很难实现自动化和省工省力,寻找替代技术和方法提上了日程。

正因为如此,本书作者致力于基于球杆仪(Double Ball Bar,简称 DBB)的运动精度测量及误差原因诊断法(书中称之为 DBB 法)的研究。可喜的是,该项研究进展顺利,在机床制造厂家的大力协助下,获得了大量的现场试验数据,且好评如潮,人们期待着该项技术的实用化^[9-16]。1985 年东京精密株式会社制作了该产品的实用机型并投放市场,主要用户是机床制造厂家,推广顺利^[17]。

DBB 是一种 3 维空间误差(volumetric error)测量装置。按照美国 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)国家实验室提出的设计方案,DBB 装置由高精度圆球与磁性支座组成,能够实现球面上两点距离的精密测量。DBB 有两类,球杆固定式 DBB 和球杆伸缩式 DBB。球杆固定式 DBB 的两球固定在球杆上,用于手动三坐标测量机的精度检验,被 ASME 三坐标测量机暂行标准(AN-SA/ASME B89-1-12)采纳^[18,19]。

球杆伸缩式 DBB 中,连接两球的球杆上设置有可伸缩的滑动机构,可读取伸缩量的大小,用于三坐标测量机、铣床、加工中心、镗床、龙门铣床、坐标镗床、坐标磨床、工业用机器人等具有数控驱动圆弧插补功能的设备的运动精度测量。

用伸缩式 DBB 测量时,虽然 DBB 球面上的任意点都可作测量点用,但在实际操作时常规的做法是:固定机床的其中 1 轴而使其它 2 轴进行圆弧插补运动,测量装置在圆弧轨迹上取点,球杆的伸缩量经放大后在平面上以极坐标表示出来(该轨迹被称为运动误差轨迹)。通过分析该运动误差轨迹,进行空间精度评价。目前大多数数控机床尚不具备 3 轴联动圆弧插补进给功能(例如在球面上走螺旋轨迹),

因此,只能进行2轴联动圆弧插补进给测量。

也有和DBB法相似的测量方法,如Knapp等人利用校对环规和位移检测探针的方法^[20-23]。该方法与DBB法同期开发,除使用的装置不同之外,工作原理基本相同。由于测量探针是接触式的,高速、高精度测量时劣于DBB法,但适用于小型机床的测量。本书第2章和第3章将就上述方法进行详细地说明。

DBB法是根据测量的运动误差轨迹判断机床存在的主要误差原因的一种诊断方法。其工作原理是:首先定义各误差因素的误差矢量,推导相应的轨迹模型,然后判断运动误差轨迹中是否存在这些轨迹模式。使用DBB法需要经验,也要求对机床结构及控制系统的特性有一定了解,但对于机床制造厂家的使用者来说,一般只需通过短期培训即可掌握并有效使用。

目前,DBB法的用途主要有以下三种:

- ① 在数控机床等设备的设计开发阶段用于样机结构缺陷的早期发现与排除;
- ② 在数控机床等设备的售出(买入)阶段用于最终调试和精度检验;
- ③ 在数控机床等设备的定期检查阶段用于精度维护。

将来,DBB法还可能用于:

- ④ DBB装置内置于数控机床内,定期检查机床精度,并根据精度检查结果进行数控补偿(改变参数以保持精度)。(简而言之,就是实现上述第3项的自动化检测。)

本书的概要如下。

第2章介绍圆弧插补试验方法的原理。第3章介绍DBB装置及系统结构。第4章阐述了运动误差轨迹测量方法及其用于精度评价的方法,并说明了DBB法测量的运动误差轨迹与直接试切试验的轮廓误差的关系。第5章阐述了该诊断法的理论基础、误差原因分类、误差矢量与轨迹模式的推导以及诊断步骤等。第6章中列举了各种类型数控机床(约30台)的运动误差检验实例,详细说明了在这些机床上进行DBB法测量获得的运动误差轨迹以及由此读取的精度评价价值、机床存在运动误差的原因及其去除方法等。

第7章是本书的结论,记述了作者对DBB法发展现状及其应用的想法。

第 2 章 运动误差的定义与圆弧插补试验法的原理

2.1 运动误差的定义

本书中,机床误差以误差矢量表示。即,如果 3 坐标正交直角坐标系内的某点指令位置为 (X,Y,Z) ,实际的位置为 (X',Y',Z') ,则用

$$\mathbf{C} = (C_x, C_y, C_z) \quad (2.1)$$

定义指令位置 (X,Y,Z) 的误差矢量。式中, $C_x = X' - X, C_y = Y' - Y, C_z = Z' - Z$

而各轴进给运动对应的平移误差由矢量

$$\mathbf{E}_j = (e_{xj}, e_{yj}, e_{zj}), \quad j = X, Y, Z$$

表示,各轴进给运动对应的回转误差由矢量

$$\mathbf{R}_j = (a_j, b_j, c_j), \quad j = X, Y, Z$$

表示。其中, x, y, z 为平移误差的方向; a, b, c 为绕 X, Y, Z 轴的旋转; X, Y, Z 为进给方向。

根据上述定义,求图 2-1 所示典型立式加工中心的误差矢量。该加工中心的结构如图 2-2 所示。各运动误差的正方向如图 2-2 所示定义。

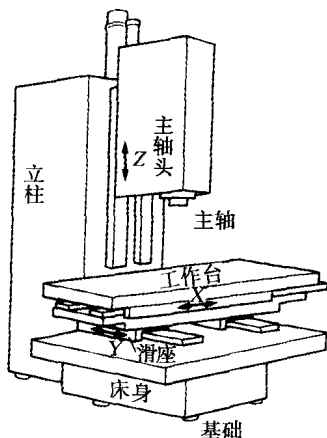


图 2-1 典型立式加工中心

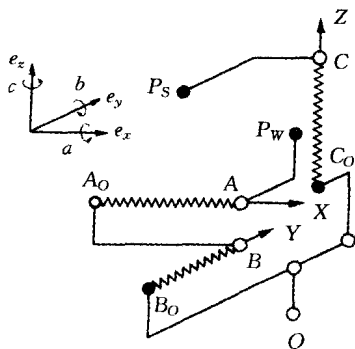


图 2-2 图 2-1 所示立式加工中心的结构

工作台上装夹的工件某点为 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$, 主轴前端为 $P_s(X_s, Y_s, Z_s)$ 。

在以 P_w 为原点, 以各平行进给轴(平移)建立的坐标系中, 主轴前端 P_s 的相对坐标用 (X, Y, Z) 表示。机械原点用 O 表示, 沿 X, Y, Z 轴进给的移动件与各导轨面或进给丝杠接触的中间点以 A, B, C 表示。 P_w 和 P_s 重合时的 A, B, C 用 A_0, B_0, C_0 表示, 则

$$\begin{aligned}\overrightarrow{P_w P_s} &= \overrightarrow{OP_s} - \overrightarrow{OP_w} \\ &= (X_s - X_w, Y_s - Y_w, Z_s - Z_w) \\ &= (X, Y, Z)\end{aligned}\quad (2.2)$$

进一步地, 若考虑机床部件及导轨结构, $\overrightarrow{OP_s}, \overrightarrow{OP_w}$ 可表示为

$$\overrightarrow{OP_s} = \overrightarrow{OC_0} + \overrightarrow{C_0 C} + \overrightarrow{CP_s} \quad (2.3)$$

$$\overrightarrow{OP_w} = \overrightarrow{OB_0} + \overrightarrow{B_0 B} + \overrightarrow{BA_0} + \overrightarrow{A_0 A} + \overrightarrow{AP_w} \quad (2.4)$$

式中, $\overrightarrow{A_0 A} = (X, 0, 0), \overrightarrow{B_0 B} = (0, Y, 0), \overrightarrow{C_0 C} = (0, 0, Z)$

以上是假设不存在机床误差时的表达式。由于实际上机床误差是存在的, P_s, P_w 实际位于 $P'_s(X'_s, Y'_s, Z'_s), P'_w(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ 的位置。(注: 本书中实际的点与坐标加“'”表示。)因此,

$$\begin{aligned}\overrightarrow{P'_w P'_s} &= \overrightarrow{OP'_s} - \overrightarrow{OP'_w} \\ &= (X'_s - X'_w, Y'_s - Y'_w, Z'_s - Z'_w) \\ &= (X', Y', Z')\end{aligned}\quad (2.5)$$

假设机床的各部件为刚体, 这样无论其姿态如何变化, 各误差矢量值是不变的。如果忽略热变形, 误差仅由进给运动产生, 则 $\overrightarrow{OP'_s}$ 可表示为

$$\overrightarrow{OP'_s} = \overrightarrow{OC_0} + \overrightarrow{C_0 C'} + \overrightarrow{C' P'_s} \quad (2.6)$$

式中, $\overrightarrow{C_0 C'} = \overrightarrow{C_0 C} + \mathbf{E}_Z$

$$\mathbf{E}_Z = (e_{xz}, e_{yz}, e_{z'})$$

$e_{z'}$: Z 轴进给系统的定位误差;

e_{xz} : 伴随 Z 轴进给运动的 X 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差);

e_{yz} : 伴随 Z 轴进给运动的 Y 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差)。

$$\overrightarrow{C' P'_s} = \overrightarrow{CP_s} + \mathbf{R}_Z \times \overrightarrow{CP_s}$$

$$\mathbf{R}_Z = (a_z, b_z, c_z) + (a_z^*, b_z^*, 0)$$

a_z, b_z, c_z : 伴随主轴头(Z 向)运动出现的倾覆力矩变化造成的主轴的回转误差。该力矩是因作用在主轴头上的重力、配重力、滚珠丝杠驱动力以及滑动摩擦力的作用点变化而产生的。

$a_z^* (b_z^*)$: 伴随 Z 轴进给运动因 $Y(X)$ 轴方向的直线度误差造成的主轴头绕 $X(Y)$ 轴回转的回转误差。

$$\overrightarrow{OP'_w} = \overrightarrow{OB_0} + \overrightarrow{B_0 B'} + \overrightarrow{B' A'_0} + \overrightarrow{A'_0 A'} + \overrightarrow{A' P'_w} \quad (2.7)$$

其中, $\overrightarrow{B_0B'} = \overrightarrow{B_0B} + \mathbf{E}_Y$

$$\mathbf{E}_Y = (e_{xY}, e_{yY}, e_{zY})$$

e_{yY} : Y 轴进给系统的定位误差;

e_{xY} : 伴随 Y 轴进给运动的 X 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差);

e_{zY} : 伴随 Y 轴进给运动的 Z 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差)。

$$\overrightarrow{B'A'_0} = \overrightarrow{BA_0} + \mathbf{R}_Y \times \overrightarrow{BA_0}$$

$$\mathbf{R}_Y = (a_Y, b_Y, c_Y) + (a_Y^*, 0, c_Y^*)$$

a_Y, b_Y, c_Y : 在伴随滑座 Y 向进给运动出现的力矩作用下产生的主轴头回转误差。该力矩是因作用在滑座上的滚珠丝杠驱动力以及滑动摩擦力作用点变化造成的。

$a_Y^*(c_Y^*)$: 伴随 Y 轴进给运动因 Z(X) 轴方向的直线度误差造成的滑座绕 X(Y) 轴回转的回转误差。

$$\overrightarrow{A'_0A'} = \overrightarrow{A_0A} + \mathbf{E}_X + \mathbf{R}_Y \times (\overrightarrow{A_0A} + \mathbf{E}_X)$$

$$\mathbf{E}_X = (e_{xX}, e_{yX}, e_{zX})$$

e_{xX} : X 轴进给系统的定位误差;

e_{yX} : 伴随 X 轴进给运动的 Y 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差);

e_{zX} : 伴随 X 轴进给运动的 Z 轴方向的直线度误差(包含垂直度误差)。

$$\overrightarrow{A'P'_w} = \overrightarrow{AP_w} + (\mathbf{R}_Y + \mathbf{R}_X) \times \overrightarrow{AP_w}$$

$$\mathbf{R}_X = (a_X, b_X, c_X) + (0, b_X^*, c_X^*)$$

a_X, b_X, c_X : 在伴随工作台 X 向进给运动出现的力矩作用下所产生的工作台回转误差。该力矩是因作用在工作台上的滚珠丝杠驱动力以及滑动摩擦力作用点变化造成的。

$b_X^*(c_X^*)$: 伴随 X 轴进给运动因 Z(Y) 轴方向的直线度误差造成的工作台绕 Y(Z) 轴回转的回转误差。

将式(2.3)、(2.4)代入式(2.2), 式(2.6)、(2.7)代入式(2.5), 误差自乘后值很小而忽略, 则由式(2.1)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \overrightarrow{P'_wP'_s} - \overrightarrow{P_wP_s} \\ &= -\mathbf{E}_X - \mathbf{E}_Y + \mathbf{E}_Z - \mathbf{R}_X \times \overrightarrow{AP_w} - \mathbf{R}_Y \times \overrightarrow{BP_w} + \mathbf{R}_Z \times \overrightarrow{CP_s} \end{aligned} \quad (2.8)$$

整理式(2.5)~(2.8)中的误差种类, 说明如下。

(1) 定位误差(e_{xX}, e_{yY}, e_{zZ})

定位误差在闭环控制方式下是由光栅测量误差和伺服系统自身的误差造成的; 在半闭环控制方式下, 则是由伺服系统的误差及滚珠丝杠驱动系统(螺母、滚珠丝杠、联轴器、伺服电机)的误差造成的。

(2) 直线度误差和垂直度误差($e_{xY}, e_{xZ}, e_{yX}, e_{yZ}, e_{zX}, e_{zY}$)

这些误差是在机床安装后,由床身、立柱、滑座自身以及其上安装的导轨的形状误差造成的。

(3) 回转误差 1($a_Z^*, b_Y^*, c_Z^*, a_X^*, b_X^*, c_X^*, a_Y^*, b_Y^*, c_Y^*$)

同(2),是在机床安装后,由床身、立柱、滑座自身以及其上安装的导轨的形状误差造成的。

(4) 回转误差 2($a_Z, b_Z, c_Z, a_X, b_X, c_X, a_Y, b_Y, c_Y$)

这些误差的大小由伴随移动件移动出现的重力、配重力、滚珠丝杠驱动力以及滑动摩擦力等作用在移动件上所产生的回转力矩的大小以及约束移动件移动的导轨刚度的大小决定。进给加速度很大时,还必须考虑惯性力的作用。

上述误差产生的原因将在第5章中详细分析说明。

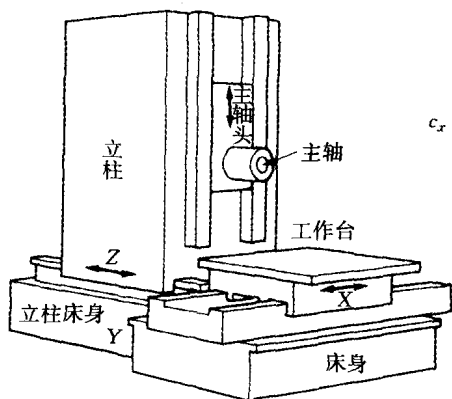


图 2-3 典型卧式加工中心的外观

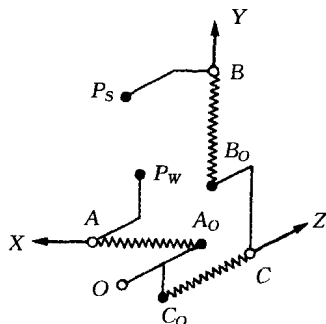
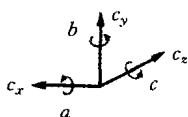


图 2-4 图 2-3 所示卧式加工中心的结构

下面考虑如图 2-3 所示的典型立柱可移动式卧式加工中心的情况。这时的误差矢量成分的分类与上述立式加工中心的分类相同,不再赘述。立柱可移动式卧式加工中心的结构如图 2-4 所示。若各运动误差的正方向如图 2-4 中的定义,则式(2.3)和(2.4)变为

$$\overrightarrow{OP_s} = \overrightarrow{OC_o} + \overrightarrow{C_oC} + \overrightarrow{CB_o} + \overrightarrow{B_oB} + \overrightarrow{BP_s} \quad (2.9)$$

$$\overrightarrow{OP_w} = \overrightarrow{OA_o} + \overrightarrow{A_oA} + \overrightarrow{AP_w} \quad (2.10)$$

相应地,式(2.6)和(2.7)也作如下变化:

$$\overrightarrow{OP_s} = \overrightarrow{OC_o} + \overrightarrow{C_oC'} + \overrightarrow{C'B_o} + \overrightarrow{B_o'B} + \overrightarrow{B'P_s} \quad (2.11)$$

其中, $\overrightarrow{C_oC'} = \overrightarrow{C_oC} + \mathbf{E}_Z$

$$\overrightarrow{C'B_o} = \overrightarrow{CB_o} + \mathbf{R}_Z \times \overrightarrow{CB_o}$$

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{B'_0B} &= \overrightarrow{B_0B} + \mathbf{E}_Y + \mathbf{R}_Z \times (\overrightarrow{B_0B} + \mathbf{E}_Y) \\
\overrightarrow{B'P'_s} &= \overrightarrow{BP_s} + (\mathbf{R}_Z + \mathbf{R}_Y) \times \overrightarrow{BP_s} \\
\overrightarrow{OP'_w} &= \overrightarrow{OA_0} + \overrightarrow{A_0A'} + \overrightarrow{A'P'_w}
\end{aligned} \quad (2.12)$$

其中, $\overrightarrow{A_0A'} = \overrightarrow{A_0A} + \mathbf{E}_X$

$$\overrightarrow{A'P'_w} = \overrightarrow{AP_w} + \mathbf{R}_X \times \overrightarrow{AP_w}$$

将式(2.9)和(2.10)代入式(2.2),式(2.11)和(2.12)代入式(2.5),误差自乘项值小忽略不计,则由式(2.1)可得

$$\begin{aligned}
\mathbf{C} &= \overrightarrow{P'_wP'_s} - \overrightarrow{P_wP_s} \\
&= -\mathbf{E}_X + \mathbf{E}_Y + \mathbf{E}_Z - \mathbf{R}_X \times \overrightarrow{AP_w} + \mathbf{R}_Y \times \overrightarrow{BP_s} + \mathbf{R}_Z \times \overrightarrow{CP_s}
\end{aligned} \quad (2.13)$$

上述的两种结构类型的机床,误差矢量由机床结构的不同,符号虽然有所变化,但表达式形式相同。其它结构的机床也是如此。即,主轴移动的轴方向的误差项的符号为正,工作台移动的轴方向的误差项的符号为负。

式(2.8)和(2.13)中,包含回转误差的项表示如下:

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_X \times \overrightarrow{AP_w} &= (b_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_z - c_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_y, c_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_x - a_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_z, a_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_y - b_X \cdot (\overrightarrow{AP_w})_x) \\
\mathbf{R}_Y \times \overrightarrow{BP_s} &= (b_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_z - c_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_x, c_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_y - a_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_z, a_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_x - b_Y \cdot (\overrightarrow{BP_s})_y) \\
\mathbf{R}_Y \times \overrightarrow{BP_w} &= (b_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_z - c_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_y, c_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_x - a_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_z, a_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_y - b_Y \cdot (\overrightarrow{BP_w})_x) \\
\mathbf{R}_Z \times \overrightarrow{CP_s} &= (b_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_z - c_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_y, c_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_x - a_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_z, a_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_y - b_Z \cdot (\overrightarrow{CP_s})_x)
\end{aligned} \quad (2.14)$$

若将 P_w 、 P_s 置于 $(\overrightarrow{AP_w})_x$ 、 $(\overrightarrow{BP_w})_y$ 、 $(\overrightarrow{BP_s})_y$ 、 $(\overrightarrow{CP_s})_z$ 为 0 的位置,则回转运动产生的误差矢量成分由各回转误差与产生回转误差的进给方向导轨面或进给丝杠至 P_w 、 P_s 的垂直距离的乘积表示。

2.2 圆弧插补试验法及其进行误差原因诊断的原理

在具有圆弧插补功能的数控机床上,圆弧插补中的运动误差可通过测量主轴前端(或刀具前端)至工作台上的圆弧中心的距离变动来检测,利用该运动误差轨迹不仅能够评价运动精度,而且通过对该运动轨迹的解析能够诊断运动误差产生的原因。