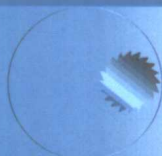


调头镗孔 理论及应用

刘裕先 刘北英 著



机械工业出版社
China Machine Press

调头镗孔理论及应用

刘裕先 刘北英 著

机械工业出版社

本书是国内首次系统地论述调头镗孔理论及应用的一本专著。书中从全面剖析各类铣镗床的结构及运动关系入手,阐述了消除机床、工件和机能效应等方面误差因素的措施。为提高调头镗孔的同轴度,本书论证了多种送进条件下各自的工件与刀具在机床坐标系中的最佳装夹位置,推导出各种误差因素的误差补偿值实用数学公式,并给出一些机床精度检验单中未列检项的新精度项目及其检测方法。内容深入浅出,图文并茂。

本书对从事制造技术的广大工程技术人员、科研人员有实用价值,也适于高校机械类专业的广大师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

调头镗孔理论及应用/刘裕先,刘北英著. —北京:机械工业出版社,1999.11

ISBN 7-111-07491-2

I. 调… II. ①刘… ②刘… III. 镗削 IV. TG530.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43606 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吴柏青 钱既佳 版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·8.25 印张·178 千字

0 001—2000 册

定价:15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

以箱体零件同轴孔系为代表的长孔镗削,是切削加工中最重要的内容之一。尽管目前仍有采用镗模或后立柱支承长镗杆实施长孔镗削的工艺实例,但近一二十年来,随着卧式数控铣镗床(含加工中心)和刨台式卧镗的大量用于生产,利用镗模、长镗杆及其它辅具提高镗孔精度的方法,正在被调头镗孔所取代。

为适应镗床结构及性能的发展趋势,ISO 的新版《卧式铣镗床检验条件——精度检验》标准(ISO3070:1997),把调头镗孔的同轴度作为重要内容列在机床工作精度检验项目之中。我国也制定了与 ISO 相同的相应机床精度的国家标准。可见变镗长孔为镗短孔的调头镗孔,已成为长孔镗削的主要工艺形式。

影响调头镗孔广泛应用的棘手问题,主要是调头镗孔后的同轴度超差。本书从支撑调头镗孔工艺之机床的设计着手,分析机床的结构及运动关系,找出影响调头镗孔同轴度的各个重要因素,进而解决这一工艺中的问题。

调头镗孔技术作为制造技术的一块领域,尚无专著或系统介绍的读物,这方面的论文也很少。为促进调头镗孔技术的研究和合理应用,并期望能够有助于相关新标准的贯彻执行,作者根据在镗床制造和使用生产一线工作时的点滴实践经验以及近些年所作的相关研究,尝试性地写了这本书。作者力图做到理论联系实际,深入浅出,图文并茂。希望本书能

对从事机床制造和应用的技术人员及科研工作者有所裨益。

全书共分六章。

第一章从镗削的特点导入;列举各种镗孔,尤其是长孔镗削的工艺形式,说明了近年来为适应卧式数控铣镗床(含加工中心)和刨台式铣镗床的发展趋势,调头镗孔已成为长孔镗削的主要工艺方式。

第二章论述了调头镗孔的关键精度是工件调头前后所镗两部分孔的同轴度。通过分析机床、工件、刀具和机能效应等调头镗孔同轴度误差的各个影响因素,提出提高调头镗孔同轴度的相应举措。

第三章全面地剖析了各类铣镗床的结构及运动关系;推导出各误差因素所造成调头镗孔的诸多同轴度误差及其补偿值的实用数学公式;并给出一些机床精度检验单中未列检项的新精度项目及其检测方法。

第四章论证了在采用工作台、立柱、镗轴等不同送进条件下,作为非送进而固定一方的工件或刀具在机床坐标系中,以提高同轴度作为目标时的最佳装夹位置。

第五章论述了机床重力变形、夹紧变形和热变形等机能效应对调头镗孔同轴度的影响,并给出消除这些影响的一些措施。

第六章讲解了高同轴度调头镗孔的实施条件和具体方法,并列举了在加工中心上调头镗削主轴孔的实例。

本书系沈阳工业大学刘裕先和北京科技大学刘北英二人合著。第一、五两章由刘北英著述,第二、三、四、六章为刘裕先所著,并相互校阅。全书由刘裕先统稿。

全书由沈阳钻镗床研究所两位所长王修家高级工程师和卞振东高级工程师审阅,并提出修改意见。

作者衷心感谢本书的审阅人;感谢曾经给予支持的陕西汉川机床厂王重贤、牛蒙和孔达三位高级工程师;感谢在本书著作过程中所有给予作者鼓励和帮助的同事和朋友;尤其要十分感谢沈阳工业大学校、院两级领导的鼓励和大力支持,没有校长的支持,本书不会这样快得以出版。

由于作者的水平、能力和查阅的文献有限,完稿时间仓促,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作者 1999年4月6日

目 录

前言

第一章 导论	1
第一节 镗削的特点	1
一、镗削的基本特点	2
二、镗孔工艺的基本形式	4
第二节 长孔镗削易出现的质量事故	7
一、长孔尺寸精度超差	8
二、长孔的形位精度超差	9
第三节 长孔镗削的工艺方式	12
一、刀具从零件一端镗进的长孔镗削	12
二、长孔的调头镗削	18
三、长孔调头镗削的优势	26
第二章 调头镗孔的同轴度	30
第一节 调头镗孔对同轴度要求的特殊性	30
一、同轴度是调头镗孔的关键精度	30
二、同轴度误差是影响工件使用性能的主要因素	32
第二节 调头镗孔同轴度误差的影响因素	33
一、机床	36
二、工件	48
三、刀具	53
第三节 提高调头镗孔同轴度的举措	56
一、提高机床等加工设备的精度	57
二、借助于辅具的精度	59
三、采用误差补偿技术	61

第三章 机床相关误差的确定与补偿	66
第一节 工作台回转 180° 的分度误差	67
一、台转导致同轴度误差 Δ_1 的确定	68
二、 Δ_1 的最佳线位移补偿值	70
三、提高回转 180° 精度的方法	73
第二节 工作台横移的定位误差	77
一、工作台横移导致同轴度误差 Δ_2 的确定	77
二、提高横移定位精度的方法	78
第三节 台转 180° 的倾角和平移误差	80
一、台面在 xy 平面内的倾角和 y 向平移	80
二、台面在 yz 平面内的倾角和 y 向平移	86
第四节 坐标移动的直线度误差	92
一、直线度对调头镗孔同轴度的影响	92
二、导轨磨损对移动直线度的影响	94
三、直线度误差的测定与减小措施	98
第五节 镗轴轴线的位置误差	103
一、镗轴轴线的空间位置分析	103
二、镗轴轴线与台心纵移线的平移误差	104
三、镗轴轴线与台心纵移线的交角误差	106
第六节 镗轴送进镗孔的同轴度误差	110
一、镗轴送进时 $\delta\beta$ 引起的同轴度误差	111
二、镗轴送进时 $\delta\gamma$ 引起的同轴度误差	115
三、镗轴伸缩运动的直线度误差	121
第四章 工件与刀具的装夹位置	123
第一节 工件位置的合理确定	123
一、工件在工作台面上的最佳位置	123
二、工作台在床身上的最佳位置	134
三、刨台式镗床立柱纵向的最佳位置	139
第二节 刀具位置的合理确定	145

一、台式铣镗床上刀具位置的合理确定	145
二、刨台式铣镗床上刀具位置的合理确定	146
第五章 机床机能效应的减小	150
第一节 重力变形的减小	150
一、下滑座重力变形的减小	150
二、镗轴自重变形的减小	155
三、前立柱重力变形的减小	161
第二节 夹紧变形的减小	171
一、夹紧机构的基本特性	173
二、夹紧机构设计时的合理措施	175
三、夹紧状态下检测机床坐标精度	177
四、实测夹紧变形量进行位移补偿	178
第三节 热变形的减小	181
一、热变形影响调头镗孔的精度	181
二、减小热变形的合理设计	183
三、工件在热平衡状态下加工	185
四、机床部件温度稳定的措施	186
五、保持加工的整体环境恒温	187
六、热变形的补偿和监控	187
第六章 高同轴度调头镗孔的实施	191
第一节 高同轴度调头镗孔应具备条件	191
一、对工件原始条件的严格要求	191
二、刀具应具备的条件	192
三、合理的切削用量	194
四、排除机能效应的影响	194
五、刀具及工件装夹在合理位置上	196
第二节 用精度高的机床实施调头镗孔	196
一、适应同轴度公差 of 机床精度等级	196
二、对应于高同轴度的精度高机床的涵义	197

三、精度高机床的特定精度要求·····	198
第三节 用误差补偿法实施调头镗孔·····	201
一、误差补偿的普遍性和实效性·····	201
二、两种类型误差两种处理方法·····	202
三、误差补偿类型·····	217
第四节 用中间测量法实施调头镗孔·····	222
一、中间测量法的涵义·····	223
二、中间测量法的实施·····	223
三、中间测量法的利弊简析·····	227
第五节 加工中心调头镗削主轴孔实例·····	228
一、工艺安排·····	228
二、加工程序·····	230
三、误差补偿·····	232
结语·····	233
附录 (JB/T 7557—94) 同轴度误差检测·····	235
参考文献·····	253

第一章 导 论

调头镗孔是镗孔的方式之一。镗孔是机械制造，特别是金属切削加工中一种最常见的孔加工方法。对于直径很大、尺寸精度和形位精度要求很高的孔，可以说不用镗削是难以加工出来的。

作为机械零件最基本几何形体的大孔、小孔、长孔、短孔、通孔、盲孔、圆孔和非圆孔等各类孔，与其它几何形体一起，使当今的机器表现出绚丽多姿的外观造型和使用功能，丰富着人们的生活内容，提高了人们的生活质量。为使各类机器的性能和精度能够满足人们的需求，必从组成机器的每一个零件的功能与精度做起。因此，孔的加工与其它几何形体加工一样，如何使其满足根据机器需要而提出的各方面质量要求，尤其是尺寸精度和形位精度的要求，就成为必须解决的问题。调头镗孔作为孔的一种加工方式，在保证孔的加工质量，尤其是长孔的尺寸精度和形位精度，提高孔的加工效率方面，有其独优的特色。

第一节 镗削的特点

镗削是用镗刀在镗床上把工件的预制孔扩大至具有一定的孔径，并提高孔形精度和降低表面粗糙度的加工过程。它是孔加工，特别是孔的精加工的主要形式之一。

镗床是完成镗削加工的主要设备。因为镗床通常都具有铣削功能，所以应称为铣镗床。使用规格、性能与精度合适

的铣镗床，是确保能镗削出质量合格零件的前提。目前，常见的用于镗孔，尤其是镗长孔的卧式铣镗床，从结构布局上看，主要分为台式和刨台式两类；从自动化程度上看，主要分为普通铣镗床和数控铣镗床（含加工中心）两种；而从精度上看，主要分为普通铣镗床、精密铣镗床和坐标镗床三种。

镗刀是完成镗削加工的另一主要设备。具有优良的材料，合适的几何角度和良好热处理性能的镗刀，是确保镗削出合格零件的另一前提。目前常使用的镗刀，分为定尺寸镗刀和非定尺寸镗刀两种。定尺寸镗刀有不可调双刃镗刀和浮动镗刀，主要用于孔的精镗。非定尺寸镗刀如单刃镗刀（镗刀头）和可调整双刃镗刀等，使用领域较广。

一、镗削的基本特点

（一）镗削的运动及加工特征

台式铣镗床上的镗削加工如图 1-1 所示，刀具固装在与镗轴同轴联结的刀杆或平旋盘之上，工件固定在工作台上。刀具同工件的相对位置，通过组成机床坐标系相应坐标方向的工作台纵、横移动、转动和主轴箱垂直移动来调整。主切削运动是镗轴或平旋盘的旋

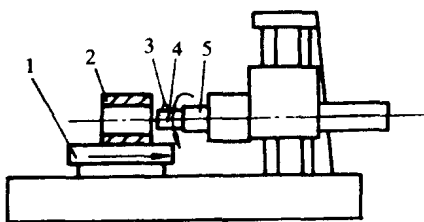


图 1-1 台式铣镗床上的镗孔

1—工作台 2—工件 3—镗刀头

4—刀杆 5—镗轴

转运动。吃刀深度通过调整刀头刀尖到刀杆轴线的距离确定。走刀运动可用刀具纵移，也可用工件的纵移实现。

被镗削孔的直径尺寸、形状及位置精度，主要靠调整镗

刀径向尺寸和镗刀杆、工件的坐标尺寸来保证。由于镗刀尺寸的调整操作是通过多次试镗进行的,因此,镗孔与扩孔、铰孔相比,其操作技术要求较高,生产效率较低,但它的应用却更广泛。这是因为镗削工艺系统的刚度较大,加工精度可靠;镗孔万能性好,大小孔都能加工;不仅能加工扩孔、铰孔不能加工的形状复杂的孔和直径大于 100mm 的孔,还可以加工止口、端面、沟槽等与孔相关的形面;更重要的是镗孔还能比较准确地纠正被加工孔轴线的歪曲与偏移。此外,镗孔与扩孔、铰孔相比,其加工的经济性更好,因为镗孔只用少量的刀杆和镗刀,就可在较大的加工范围内加工多种直径的孔,而不必像扩孔与铰孔那样需大量标准或非标准的价格昂贵的扩孔钻和铰刀。

(二) 镗削的基本特点

根据镗削加工的运动和操作形式,镗削的基本特点可归纳为如下四点。

1) 工件的镗削表面,是由镗轴上的镗刀回转及镗刀或工件的直移送进复合而成的螺旋运动形成的。镗孔质量的好坏,不像钻、铰孔质量那样几乎全部依赖于刀具,它在很大程度上取决于机床的工作精度。

2) 因为装夹在刀杆上的刀具深入孔内进行切削,镗刀是在半封闭状态下进行工作的,因此,镗削时产生的切屑和切削热不易自动排除。

3) 因镗削时刀具后面和工件内孔表面摩擦较大,而外伸的镗杆又在悬臂状态下受切削力的作用,所以镗刀的切削条件较差,易引起振动。

4) 长孔镗削时难以保证孔的质量,尤其难以确保被镗孔的圆柱度和同轴度在允差范围内。

二、镗孔工艺的基本形式

(一) 主运动的工艺形式

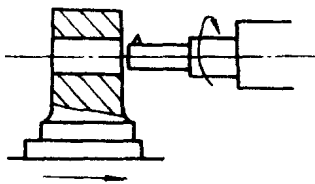
镗孔，这种镗刀旋转作为主运动实现切削的孔加工工艺形式，依据被镗工件孔的直径尺寸，可分为中小尺寸直径孔的镗轴回转镗削和大尺寸直径短孔的平旋盘回转镗削两种，常用的形式为镗轴回转的镗削。

(二) 进给运动的工艺形式

进给运动是保证镗出全部孔长的直线移动。在铣镗床上按其进给运动执行的部件来分，镗孔工艺基本上可分为下述两种形式。

1. 工件送进镗孔 不言而喻，这是在镗孔过程中，装在镗轴上的刀具轴向固定不动，确保全孔长镗成的进给运动是由工件直移送进完成的。因工件装夹在工作台上，工件送进镗孔就是工作台送进镗孔，而工作台移动只适用于各类台式铣镗床，刨台式和落地式各类铣镗床的工作台是不能沿孔轴线（纵向）方向移动或根本不能移动的，根本不可能采用工件送进镗孔这种工艺形式。所以，工件送进镗孔也只能用于各类台式铣镗床。

具体实现工件移动进给的形式，可分为镗轴上通过刀杆装夹刀具，工作台带着工件的送进镗孔和平旋盘上装夹刀具（轴向不动），工作台带着工件的送进镗孔两种。



(1) 镗轴上装夹刀具的工件送进镗孔 如图 1-2 所示，在这种工件的送进镗孔中，镗轴带动

图 1-2 镗轴上装刀时工件送进镗孔

刀具只作旋转运动，台式铣镗床的工作台作走刀运动，其方

向同被加工孔的轴线方向一致。只有当工作台的送进方向是一条直线时，孔的轴线才是直线。送进方向中所有的偏差，都可能引起孔的轴线弯曲和偏移。因此，工件送进镗孔的精度，基本上取决于机床本身的精度，特别是镗轴轴线的位置精度和沿相应坐标轴运动部件移动的直线度，受其它因素影响的程度相对较小。

由于机床的精度均已经过相应精度等级各检项的严格检验，一般情况下都能确保其相应精度的加工质量。所以，相对于另一种的镗轴送进镗孔，工件送进镗孔更适用于精镗和长孔镗削。

(2) 平旋盘上装夹刀具的工件送进镗孔 这种形式的工件送进镗孔，是带动刀具实现旋转主运动的平旋盘轴向固定不动，工件沿被镗孔的轴向完成走刀运动，从而实现全孔长的镗削，如图 1-3 所示。

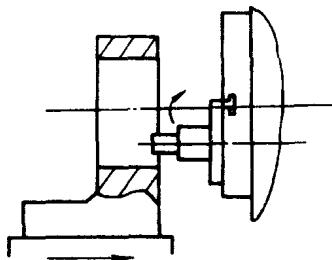


图 1-3 平旋盘上装时工件
送进镗孔

此种形式镗孔，只适于镗削直径尺寸很大而孔长尺寸很小那种长径比往往小于 1 的孔，尤其适用于端面对孔有垂直度要求的大孔镗削。

2. 镗刀送进镗孔 因为在镗床上完成一个孔的完整加工，对于镗刀送进镗孔来说，是在镗刀转动并切入工件一定切削深度的同时，再相对工件给予刀具一个进给运动实现的，所以镗刀送进镗孔，就是指在镗孔过程中，确保全孔长镗成的进给运动是通过工件固定不动，刀具相对工件直线移动完成的。具体实现刀具移动送进的形式有下述两种。

(1) 镗轴送进镗孔 如图 1-4 所示，此种镗孔工艺是装

夹工件的工作台固定在床身的一个确定位置不移动，镗床的主轴（即镗轴）带动刀杆、刀具作旋转运动的同时，又作轴向走刀运动。如果需镗之孔较长，用镗轴送进镗孔时，镗轴伸出的悬臂长度较长，由于镗轴自重的影响，必将导致镗轴悬臂挠曲变形的增加，镗出孔的质量将会下降。因此，这种送进形式只适于粗镗和短孔镗削，不宜于精镗，尤其不宜于镗长孔。

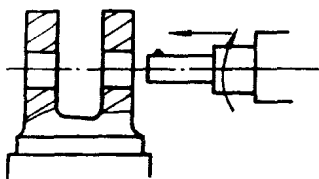


图 1-4 镗轴送进镗孔

(2) 立柱送进镗孔 对于工作台不能纵向移动的刨台式铣镗床，工作台（工件）固定不动，为避免镗轴送进长孔时镗轴自重产生过大挠度的影响，采用立柱平行于镗轴移动作为走刀运动，见图 1-5 所示，显然，立柱移动带动其上面装夹的主轴箱、镗轴以及镗刀一起前移，这

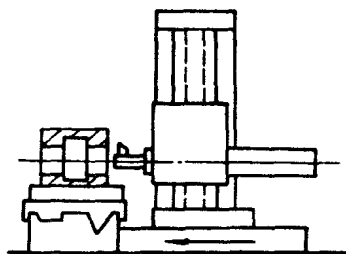


图 1-5 立柱送进镗孔

应属于镗刀送进镗孔。但这种立柱带着镗刀的送进形式，在镗削全孔长的过程中，要求镗轴伸出的长度是一个固定不变的值，单就这一点来讲，它与工作台送进是相同的，只要其伸出孔长所需的足够长度即可，悬伸量固定，镗刀相对于立柱或主轴箱位置不变，所以镗成孔的轴线不受镗轴自重变形的影响。可见立柱送进镗孔的精度，与工作台送进镗孔相近，基本上取决于机床本身相应检项的几何精度。因此，立柱送进镗孔，可以期望获得较高的镗孔质量，也适用于半精

镗、精镗和长孔镗削。

第二节 长孔镗削易出现的质量事故

通常所讲的长孔（深孔），是指长径比 $L/D \geq 5$ 的孔。这里所说的长孔，主要是指被镗孔长 L 的绝对值较大的孔。这是因为一方面考虑到在这种情况下镗削（尤其是镗轴送进镗削）时，易引起被镗孔的尺寸精度和形位精度变差；另一方面也考虑到当所镗削的孔径 D 值较大时，尽管 L/D 的比值并不很大，但孔长 L 的绝对值却已很大，已易使精度变差。因此，这里所说的长孔相对通常定义的长孔范围有所扩大，它把主要用镗削方法精加工的孔长较大（ L/D 值可适当降低），材质不间断的孔和同轴孔系皆包括在内。

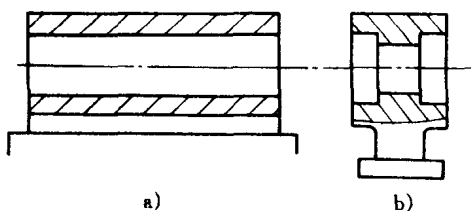


图 1-6 不间断长孔

a) 定径单孔 b) 变径复孔

不间断的长孔既可以是同一直径的单孔，如图 1-6a 所示；也可以是分段改变直径的复孔，见图 1-6b 所示。

同轴孔系是指箱体零件（或其它零件）上按串联形式排列在同一条轴线上的一系列有相互位置精度要求的轴承孔（或其它精度要求较高的孔）的总和，如图 1-7 所示。

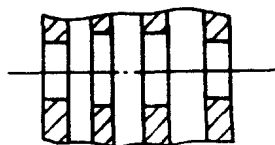


图 1-7 同轴孔系

在卧式铣镗床所加工的零件中，材质不间断的长孔并不少见，