

精密轴系回转精度测试

孙方金 陈世杰 编著
强锡富 主审

哈尔滨工业大学出版社

序

具有回转运动的精密机床和机械设备、精密仪器和测试设备,其精度的基础是精密轴系的回转精度。轴系回转时,轴线呈现径向、轴向和倾角的漂移运动。准确地测试这些误差运动,对轴系的精度鉴定、误差分析、结构和工艺的改进,促进精密机械与精密仪器工业的发展,具有重要的意义。因此,精密轴系回转精度的测试在国内外都受到普遍的重视。

本书比较系统地论述精密轴系回转精度测试技术,在介绍了常用精密轴系的工作原理和典型结构后,比较详细地叙述了回转精度的基本概念和定义、测试设备、测试方法和数据处理,探讨了形成轴系误差运动的机理,讨论了误差的分离与补偿等。

本书具有专著性、科学性、先进性、实用性等特点。全书内容紧紧围绕回转精度这一主题展开,最终形成了一个有机的整体。引用的概念与定义、理论推导与分析、测试系统与方法是严密的、先进的。书中收集了很多目前用之有效的实例,引用了丰富的数据,理论联系实际,反映了当今这一领域的实际情况和水平。

本书两位作者是航空航天工业部第一计量测试研究所孙方金研究员和哈尔滨工业大学航天学院陈世杰教授。他们在精密轴系回转精度测试这一领域具有丰富的实践经验。此外,书中不少内容来自全国高校机械工程测试技术研究会等单位主办的全国精密轴系回转精度测试基本理论 and 应用学术讨论会,因此本书在相当程度上也反映了国内广大专家学者在该领域的研究成果。

借本书出版之机,我谨把它推荐给对这一技术领域感兴趣的读者。

哈尔滨工业大学教授 强锡富

1995. 5. 20

目 录

第一章 结论	(1)
§ 1.1 研究精密轴系的意义及轴系的分类	(1)
§ 1.2 精密轴系回转精度概况	(1)
§ 1.3 精密轴系回转精度测试方法研究现状	(3)
第二章 精密轴系的典型结构	(5)
§ 2.1 精密油膜滑动轴承轴系	(5)
2.1.1 半运动式柱形轴承轴系	(5)
2.1.2 锥形滑动轴承轴系	(6)
2.1.3 V 弧滑动轴承轴系	(8)
§ 2.2 密珠轴承轴系	(10)
2.2.1 密珠轴承的组成及结构实例	(10)
2.2.2 密珠轴承的设计要点	(11)
§ 2.3 气体静压轴承轴系	(14)
2.3.1 圆柱型空气静压轴承轴系	(15)
2.3.2 双球面空气静压轴承轴系	(15)
2.3.3 混合型空气静压轴承轴系	(18)
§ 2.4 液体静压轴承轴系	(19)
2.4.1 精密仪器上应用的液体静压轴承轴系	(20)
2.4.2 精密机床上应用的液体静压轴承轴系	(20)
§ 2.5 液体动压轴承轴系	(21)
2.5.1 圆度仪用的液体动压轴承轴系	(22)
2.5.2 磨床砂轮架的液体动压轴承轴系	(23)
第三章 轴系回转精度测试的基本理论	(25)
§ 3.1 关于“CIRP 统一文件”的介绍	(25)
3.1.1 引言	(25)
3.1.2 “CIRP 统一文件”中的几个定义	(25)
§ 3.2 关于“回转轴线”定义的分析 and 论证	(29)
3.2.1 两种主要的回转轴线定义方法	(29)
3.2.2 回转中心、回转轴线及误差运动的工程定义	(30)
3.2.3 误差运动的三维空间描述法	(31)
§ 3.3 轴系误差运动测量中的一次谐波	(31)
3.3.1 一次谐波的物理意义	(31)
3.3.2 关于轴系基波误差存在性的两种意见	(32)
3.3.3 一次谐波误差运动的形成原理	(32)
3.3.4 轴系一次简谐运动的实验描述和工程验证	(34)

3.3.5 轴系的基频圆周运动	(35)
第四章 轴系回转精度的测试设备	(38)
§ 4.1 测试系统的传感器	(38)
4.1.1 电容测微仪	(38)
4.1.2 光电自准直仪	(43)
§ 4.2 测试系统的记录显示装置	(45)
4.2.1 通用仪器的选用原则	(45)
4.2.2 极坐标记录仪	(45)
第五章 轴系误差运动的测试方法	(49)
§ 5.1 轴系回转精度模拟量测试法	(49)
5.1.1 双向测试形成基圆的圆图法	(49)
5.1.2 双偏心盘形成基圆单向测试法	(52)
5.1.3 正交同步信号发生器形成基圆法	(54)
5.1.4 极坐标记录器圆图法	(55)
5.1.5 激光投射测试法	(56)
5.1.6 模拟量圆图法的数据处理	(57)
5.1.7 模拟量直角坐标测试法	(58)
§ 5.2 轴系回转精度的数字量测试法	(59)
5.2.1 数据采集器	(59)
5.2.2 单板机回转精度测试系统	(63)
§ 5.3 轴系回转精度的瞬心测试法	(64)
5.3.1 瞬心的几何描述	(64)
5.3.2 瞬心线和轮转曲线的数学模型	(65)
5.3.3 关于参数方程的分析	(67)
5.3.4 瞬心原理的测试方法	(68)
5.3.5 两点光学投射法测量瞬心	(68)
5.3.6 基于瞬心原理主轴回转运动精度的评定	(71)
第六章 误差分离技术在回转精度测试中的应用	(74)
§ 6.1 测量工具安装误差的消除(消偏)	(74)
6.1.1 硬件消偏法	(74)
6.1.2 软件消偏法	(75)
§ 6.2 工具球不圆度的误差分离技术	(92)
6.2.1 转位法误差分离技术	(93)
6.2.2 多测头法误差分离技术	(100)
第七章 轴系误差运动机理	(110)
§ 7.1 空气静压轴承轴系径向误差运动的形成及估算	(110)
7.1.1 径向误差运动形成机理	(110)
7.1.2 径向误差运动的估算	(112)
7.1.3 计算举例与实验验证	(113)
7.1.4 结论	(114)

§ 7.2	液体润滑轴承轴系误差运动形成机理	(115)
7.2.1	双周误差的形成	(115)
7.2.2	双周误差的检测实验	(116)
7.2.3	影响轴系双周误差的因素分析	(117)
§ 7.3	滚动轴承轴系误差运动的成因	(118)
7.3.1	滚动轴承误差运动的几何计算	(118)
7.3.2	密珠轴承的误差运动分析	(119)
第八章	轴系回转误差运动的补偿	(120)
§ 8.1	回转轴系确定性误差补偿	(120)
8.1.1	TALY-73 圆度仪主轴误差补偿	(120)
8.1.2	精密车床主轴误差补偿	(123)
8.1.3	精密磨床圆度误差补偿	(124)
§ 8.2	轴系回转运动误差动态数据分析与全误差补偿	(124)
8.2.1	预报补偿在车床上的实验	(125)
8.2.2	AR 模型阶数的判定	(126)
8.2.3	补偿控制及结果	(128)
附录(一)	平均消偏法计算程序	(130)
附录(二)	逼近法消偏计算实例	(133)
附录(三)	反向法测试轴系径向回转精度数据处理	(134)
附录(四)	反向法分离工具球误差数据处理	(136)
参考文献		(138)

第一章 绪 论

§ 1.1 研究精密轴系的意义及轴系的分类

精密回转轴系是精密机床和精密仪器的关键部件,是系统精度的基础。对精密轴系的研究,关系到航海、航空、航天技术、机床业和仪器业的发展,关系到产品设计的更新。很多精密仪器(如:测角仪、圆度仪、圆刻机、惯导测试设备,跟踪雷达和电影经纬仪等遥测设备),车、镗、磨等精密机床,其轴系精度往往是保证设备精度的必要条件。因此,国内外对精密轴系的原理、结构、性能、精度和测试方法,开展了大量的研究工作,发展很快。精密轴系的研究工作受到了国内外的重视。

精密轴系的类型很多,按摩擦的性质可分为滚动摩擦轴系和滑动摩擦轴系两大类。滚动摩擦轴系如滚珠轴承轴系、密珠轴承轴系等;滑动摩擦轴系根据不同的润滑介质可分为气体润滑轴系和液体润滑轴系,如:普通滑动轴承轴系、空气静压轴承轴系、液体静压轴承轴系、空气动压轴承轴系和液体动压轴承轴系等。按轴系的转速可分为高速轴系和低速轴系。高速轴系主要用于精密机床和大型计算机的磁盘机,其转速自每分钟数百转至数万转;低速轴系主要用于精密仪器、圆刻机和陀螺仪表的测试设备,其转速自数秒一转至模拟地球自转时的二十四小时一转。在结构设计时高速轴系不仅要求保证回转精度和刚度,而且要求具有较小的振动和发热量,具有足够的耐磨性;低速轴系要求具有较高的回转精度,一定的刚度,转动的平稳性,使用中尽量不需维修等。

随着近代科学技术的发展,对轴系精度要求不断提高,轴系的设计思想从单纯应用运动学原理、不许有多余约束,向应用弹性平均原理、动力学方向发展。气体和液体静压、动压轴系,由于误差平均作用,轴系的精度可以高于零件的加工精度。这种高精度轴系与其组成件的误差比例约为 1:4,即当零件加工的形状误差为 $4\mu\text{m}$ 时,装配后的轴系可以达到 $1\mu\text{m}$ 的回转精度。对较低精度的轴系,设计与工艺措施得当时,甚至可达 1:10。这些轴系的约束可认为是无穷多。密珠轴系也具有一定的误差平均作用,大致可达到 1:2 的效果。从此观点出发,轴系又可分为具有误差均化作用的轴系和一般轴系。

§ 1.2 精密轴系回转精度概况

目前国内外对精密轴系回转精度的表达方式尚不统一,回转精度的计量标准和量值

的比对、传递工作尚未建立,因此本书提出的数据仅供参考。表 1.1 所列数据中,有些是科研成果实际达到的精度,有些是批量生产的指标数据,各家所用测试方法没有统一的标准。参考表 1.1 中所列数据,还要特别注意区别轴系的尺寸和承载能力,并区分是单件精度还是批量精度。

表 1.1 典型精密轴系及相应精度

精密机床等高速轴系							
国别	轴系	原理	回转精度 (μm)	国别	轴系	原理	回转精度 (μm)
荷兰	Hikro Turn 超精车床	液体静压	径向 0.1	瑞士	RUH450 外圆 磨床砂轮架主 轴	液体动压	径向 0.1~0.20
	DR133 精密车床	液体静压	径向 0.025				
美国	DOALL1430 -14 精密平面 磨床砂轮架主 轴	空气静压	径向 0.1	中国	航空部 625 所 JQ-1 精密球 加工车床	液体静压	加工球不圆度 0.1~0.2
	Union Carbide 公司的摩尔 (MOORE) 车 床	空气静压	径向 0.025				
英国	CMC 精密磨 床砂轮架主轴	空气静压	径向 0.025		沈阳机床厂 SJ-222 高精 度磁盘车床	液体静压	径向 0.18
日本	芝浦电器公司 球轴承金刚石 车床	空气静压	径向 0.03		广州机床研究 所车床主轴	液体静压	径向 0.038 (综合误差)

陀螺仪表测试设备轴系							
国别	轴系	原理	回转精度 (角秒)	国别	轴系	原理	回转精度 (角秒)
美国	51C 陀螺漂移 测试台轴系	空气静压	角回转精度 ± 1 角回转精度 垂直轴:1.3 (单周)	中国	哈尔滨工业大 学 DPCT-I 单轴陀螺漂移 测试台轴系	空气静压	角回转精度 0.6 480 ω_k ~20 ω_k 峰-峰值
中国	航天部一院十 三所、昆明机 床厂 ST-1 双 轴伺服转台	空气静压	10 周变动量 0.86 水平轴 0.09 (单周) 10 周变动量 0.09		航空工业部 303 所 SFT-2 伺服转台轴系	空气静压	角回转精度 ± 0.3

精密仪器低转速轴系

国别	轴系	原理	回转精度 (μm)	国别	轴系	原理	回转精度 (μm)
英国	Talyrond73 型 圆度仪轴系	液体动压	径向 ± 0.025	中国	长春光机所、 光电技术所、 昆明机床厂 QGG405 光电 圆刻机轴系	滑动摩擦	径向 0.07
	Talyrontric 转 台轴系	空气静压	径向和轴向 ± 0.013 承载 2250N		上海机械学院 超高精度轴系 (双球型)	液体静压	径向 0.013 轴向 0.017 承载 2330N
日本	东京圆度仪轴 系	空气静压	径向 ± 0.01	中国	重 庆 大 学 QGG405B 光 电圆刻机轴系	空气静压	径向 0.05
德国	O. F. D. TKF1000 圆 刻机轴系	滑动摩擦	径向 0.2		航 空 工 业 部 303 所圆光栅 检验仪轴系	液体动压	径向 0.027 $3\sigma \pm 0.012$
	Heidenbain 测 角比较仪双球 面轴系	空气静压	径向 0.02		航天部 102 研 究所精密数显 转台轴系	空气静压	径向 0.026 $3\sigma \pm 0.018$
中国	上 海 机 床 厂 HYQ14A 圆 度仪轴系	液体动压	径向 0.067		上海计量技术 研究所、汉江 机床厂 HTY- O15 高精度圆 光栅检验仪轴 系	空气静压	径向 0.03~ 0.04
	北京机电研究 院 YZY-2 圆 度圆柱度仪轴 系	液体静压	径向 0.1				

由表中数据可看出国内外轴系回转精度相当高,精密轴系结构向液浮和气浮方向发展。

§ 1.3 精密轴系回转精度测试方法研究现状

轴系回转精度的测试是轴系研究中的关键课题,它不仅可以准确鉴定轴系达到的精度,而且为分析轴系的误差源,改进轴系设计,预见精密机床所能达到的零件加工精度等提供必要条件。轴系回转精度测试牵涉面很广,包括轴系回转运动误差理论分析、回转精度的定义、测试原理及测试方法的研究、测试设备的研制以及毫微米级测试标准的制定等。制定一套完整的用于精密轴系精度检测的标准和传递体系,已不再是遥远的设想,而是当前现实的要求。为此国内外都对轴系的测试给予了高度的重视,进行了大量的研究工作,学术活动活跃,科研成果涌现,出现了欣欣向荣、朝气蓬勃的局面。国际上,国际机械生产技术研究协会(CIRP)经过四年的编制工作,于 1976 年正式发表了“关于回转轴性能要求和误差运动测定的统一”文件〔1〕。在国内,全国高校机械工程测试技术研究会、中国机械工程学会机械加工学会,于 1981 年 9 月在牡丹江镜泊湖联合召开了第一次全国高精度回转轴系测试基本理论和应用学术讨论会(以下简称第一次全国轴系会议)。1983 年 12

月在成都召开第二次全国高精度回转轴系测试基本理论和应用学术讨论会,交流论文 52 篇,并进行了测试仪器展览和表演。1985 年 10 月于长沙,又由全国高校机械工程测试技术研究会、中国机械加工会、中国计量测试学会几何量专业委员会联合召开了第三次全国高精度回转轴系测试基本理论和应用学术讨论会,交流论文 54 篇。这三次轴系会议代表人数多,论文质量高,学术气氛活跃,所讨论的学术问题无论深度和广度都达到了相当高的水平,充分反映了我国轴系研究和测试的水平,促进了新型轴系和新型测试仪器的研制,促进了轴系测试技术的提高。

轴系测试的研究工作主要围绕着基本理论、测试方法和仪器研制等三个方面进行的。在基本理论方面,CIRP 的统一文件发挥了积极的作用,但是它是 70 年代中期研究成果的总结,代表了 70 年代中期的水平,而且主要是针对机床行业的。由于现阶段轴系测试技术在国内外发展都很快,因此 CIRP 统一文件存在着一些不完善和不明确之处。国内对轴系测试基本理论的研究,如:回转精度的定义、轴系误差是否存在一次谐波成分、一次谐波误差的检测原理、轴系的双周误差等理论问题都具有精辟的分析与见解,是对 CIRP 统一文件的重要补充,为制订我国关于轴系测试的名词和术语标准,为我国关于轴系测试标准的统一,准备了良好的条件。在测试技术方面,出现了误差分离、谱分析、动态数据分析、曲线拟合等多种测试与数据处理方法。轴系测试技术的基本发展趋势为:从模拟量测量法向数字量测量法发展;从采用标准器向应用“误差分离”技术发展;从常规检验向对测量机和加工机械进行在线测量和误差补偿发展;高速轴系从定性测试向亚微米级的定量测试发展;低速轴系从亚微米级向毫微米级发展等。在测试仪器方面,国内研制成功了各具特色的多种电容测微仪以及数显自准直仪等通用测试仪器,研制成功了多种轴系回转精度测试仪,并提出了微位移的计量检定标准,初步形成了由通用测试仪器、专用测试仪器、计量标准组成的轴系测试设备的体系,有效地改善了实验条件。随着测试设备品种增多,应用广泛,统一量值的需要日趋突出,建立计量标准,特别是动态测试标准,开展量值比对,使专用测试仪器标准化、系列化,制订检定规程等工作都需逐步开展。测试设备也需提高精度,改善性能,如:满足毫微米级的测试要求,提高仪器频响以满足超高速轴系的测试,改善仪器的长期工作稳定性以满足超低速轴系的测试,在线测量以实现测试和加工相结合,轴系误差运动的信号分析,在线补偿等,还要作大量的工作。总的来说,我国的轴系研制和测试,取得了很大进展,出现了不少具有国际先进水平的科研成果,但还有很多急待解决的课题,还有很多工作要做,使我国的精密轴系的研制和测试技术不断提高,更好地为“四化”建设服务。

第二章 精密轴系的典型结构

各种精密轴系的核心部件是轴承,它决定了轴系的性能和精度。多数情况下,构成轴系除轴承外,还需辅以其它机构,才能实现轴系应有的功能。本章的内容一部分是包括轴承在内的典型轴系,另一部分内容是着重介绍精密轴系的轴承。

§ 2.1 精密油膜滑动轴承轴系

2.1.1 半运动式柱形轴承轴系

半运动式柱形轴承轴系是经纬仪轴系的典型结构,见图 2.1。轴承套固定不动,轴旋转,轴套的锥形表面和轴的外圆与平面之间,有一圈精密滚珠,锥面滚珠支承既具有支承重量的作用,又具有自动定中心的作用,锥面的顶角一般为 90° 。半运动柱形轴系的下半截与标准式柱形滑动轴承相似,但工作长度较短,以减少因锥面与圆柱面同心度偏差所引起的卡滞现象,并使转动时的摩擦力减少。半运动式柱形轴承轴系在相同参数条件下,比标准式柱形轴承轴系容易得到较高的置中定向精度。由于采用十几粒钢珠支承,支承点是滚动摩擦,因此转动时摩擦力矩小,启动灵活,磨损小,寿命长。同时,对温度不敏感,低温时不致发生卡死现象。装配时研磨工作量也较标准圆柱形轴系为小,有利于大量生产。由于有上述各项优点,因此国产的 J07、J1、J2、J6 级经纬仪,瑞士、德国等国生产的中、高等精度经纬仪都大量采用了这种轴系。半运动式柱形轴系工艺要求较高,要求轴套锥面的顶点与轴套下端定位孔的中心线重合,重合精度在 $1\mu\text{m}$ 左右;锥面椭圆度要小,轴的定位外圆和支承端面要保持垂直,同一轴上钢珠的椭圆度和直径差异在 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 内。这些要求,按目前的工艺水平已完全能达到。在拆装半运动式柱形轴系时,为了防止钢珠落地散失,须把仪器倒放,即采用“倒拔”法。钢珠如有遗失,则须全部更换。使用时间较长时,与钢珠接触的轴及轴套处可能产生压痕,致使转动时发生噪声。此时可换上一圈稍大或稍小的钢珠。新珠直径为: $d' > d + B \tan \alpha$, 或 $d' > d - B \tan \alpha$, 式中 d 为原珠直径, B 为钢珠在轴套锥面上压痕宽度, α 为锥角的 $1/4$, 并要相应地调整经纬仪的光路。

半运动式柱形轴系上部的晃动对于下部而言几乎可以忽略不计,因此可认为晃动是仅由下部圆柱配合面的间隙产生,晃动的等效中心在钢珠与锥面接触圈的法线交点 O 处,见图 2.1,故半运动式轴系的等效工作长度为: $L' = L + \frac{D+d}{2}$ 。如下部直径间隙为 Δh ,

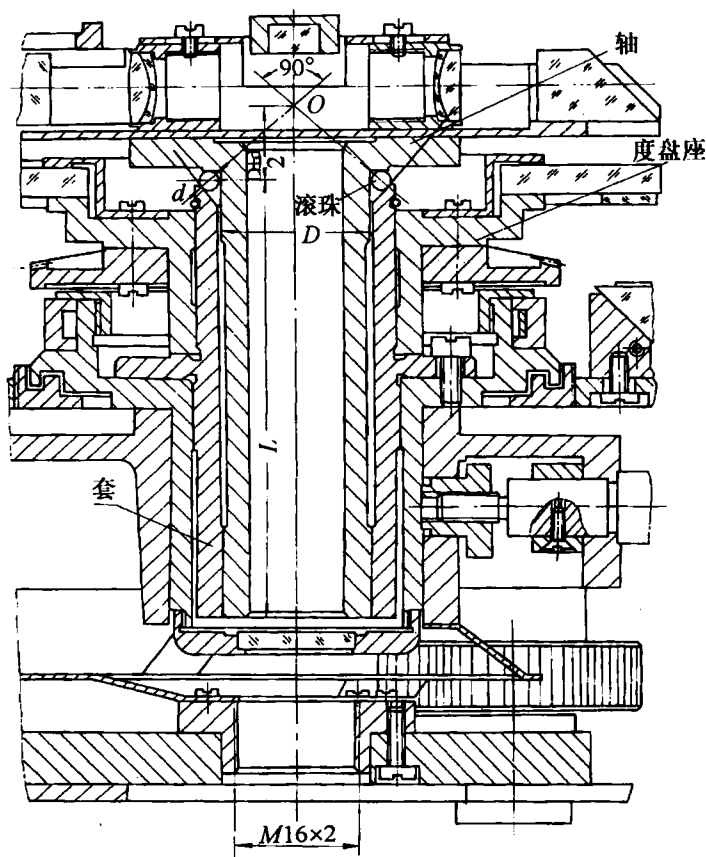


图 2.1 半运动式柱形轴承轴系结构

则引起的角运动误差 $\varphi = \frac{\Delta h \rho''}{2(I + \frac{D+d}{2})}$, 式中 ρ'' 为角度与弧度换算系数。而标准圆柱轴系

角误差 $\varphi = \frac{\Delta h}{L} \rho''$ 要大一倍以上。半运动式轴系的角回转精度可达 $1''$ 。

2.1.2 锥形滑动轴承轴系

锥形滑动轴承轴系的轴承由相同锥度的轴与轴套所组成,中间靠薄薄的润滑油隔开。在零件加工精度不太高的情况下,通过轴和轴套的“对研”,可以得到很高的吻合精度,而且便于修理。轴与轴套的间隙可以通过调节机构来改变,所以在温度变化或使用磨损后,可以调整工作间隙。这种锥形轴承轴系曾广泛应用于经纬仪和圆刻机,但目前经纬仪轴系绝大部分已被半运动式柱形轴承轴系所代替。OFD 圆刻机轴系仍采用锥形轴承,其结构见图 2.2(a)。

该轴系的基本结构参数是圆锥角 α (图 2.2(b)),轴总长 500mm,定位直径 d ,上端 $\Phi 90\text{mm}$,下端 $\Phi 50\text{mm}$,定位部分长度 $L=60\text{mm}$ 。圆锥角 2α 一般选用 $4^\circ \sim 15^\circ$,精密轴系 α 选小些,但 α 角与轴套正压力 N 有关。由图 2.2(b)可知

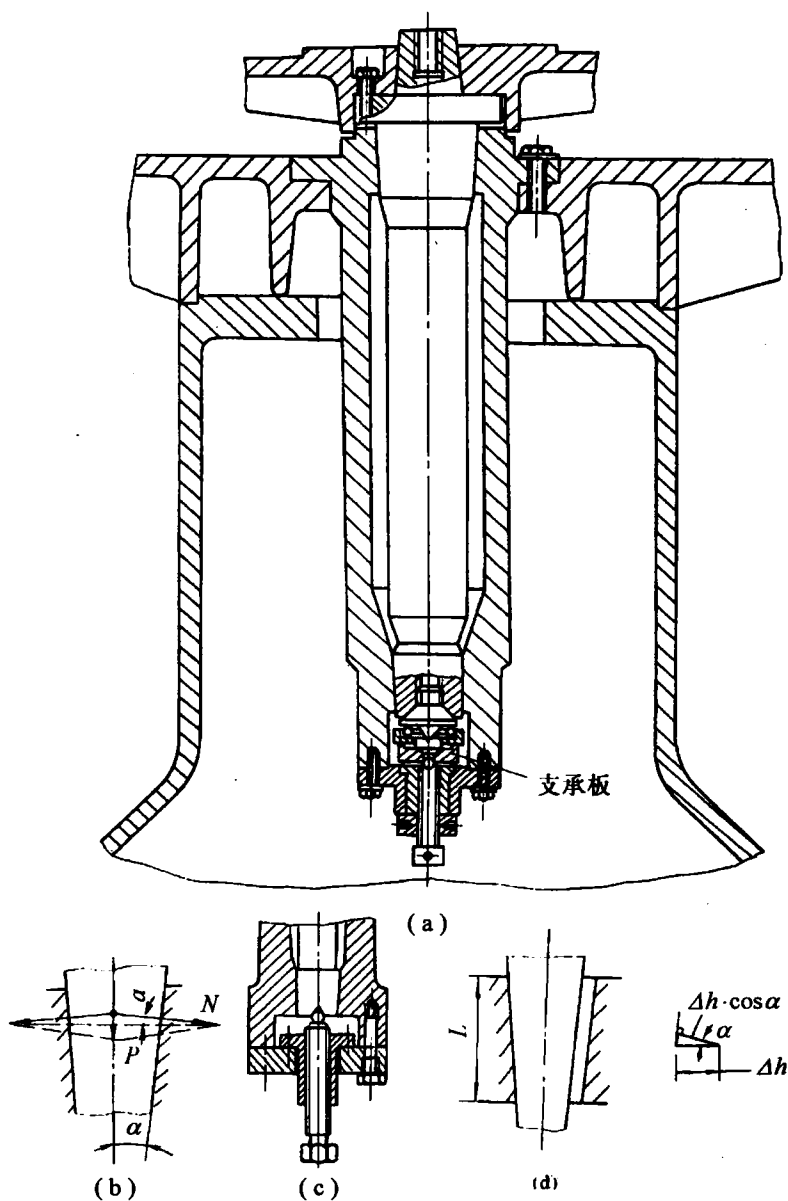


图 2.2 OFD 圆刻机轴系

$$N = \frac{P}{2\sin\alpha}$$

式中 P 为仪器上部重量, 当 $2\alpha=4^\circ$ 时, $N=14P$ 。由于正压力大, 因此摩擦力也大, 虽然增加 2α 可以改善正压力, 但当 $2\alpha>15^\circ$ 时, 仪器上部不能承受横向力(垂直轴系中心线的力), 轴系旋转时可能引起跳动, 降低旋转稳定性。为了减小摩擦, 往往把轴套的中间部分车成空刀, 使其只在两端接触, 即减小了摩擦面积又不降低稳定性。负荷较大的锥形轴系, 如 OFD 圆刻机, 在轴下端用一圈滚珠支承, 滚珠直径 $\Phi 7\text{mm}$, 一周 6 个, 中心为一个 $\Phi 10\text{mm}$ 滚珠。仪器上部的重量大部分压在滚珠上, 从而减小对轴套的压力。中间一颗大

滚珠即可用于调节轴系工作间隙,又能使支承板作微量摆动,用以补偿与一圈滚珠相接触的轴端面的不垂直的影响。

锥形轴承轴系连续的润滑油膜可能形成“油团”造成轴系回转时产生双周误差,即轴系回转二周时,回转运动误差变化一个周期,详见第七章。如轴承直径间隙为 Δh ,见图2.2(d),则可能引起的角误差运动为: $\Delta\varphi = \frac{\Delta h \cos\alpha}{L} \cdot \rho''$ 。此外,这种轴系使用时,需定期清洗与调整。

2.1.3 V 弧滑动轴承轴系

V 弧滑动轴承轴系具有很高的置中精度。以前这种轴系多在水平状态下工作,主轴依靠自重贴紧在 V 形轴承块上。为了能用于垂直工作状态,国内研制成功了立式 V 弧轴承轴系,这种轴系按 V 形轴承原理进行工作,其中的 V 形块是由圆弧面构成的。根据不同的使用情况,三段圆弧可具有不同的圆心,分布成不同的角度;轴承依靠轴套的微量变形

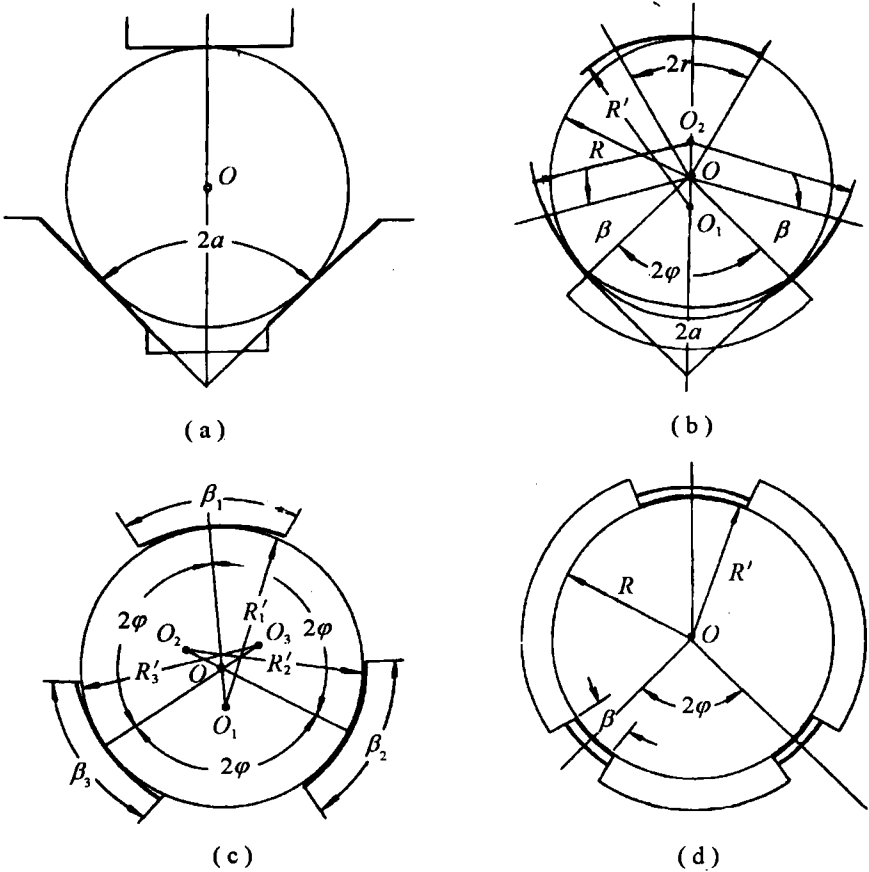


图 2.3 V 形弧轴承的设计布局

O —主轴轴心; O_1, O_2, O_3 —轴套圆柱面中心; R —主轴半径;

R' —轴套圆弧半径; 2φ —轴套空槽角; 2α —V 形弧角; 2γ —压块弧张角; β —轴套弧张角。

来调整间隙和精度;轴套就是一个油筒,灌满润滑油,主轴浸在油中,润滑良好,构件温度容易均匀一致。V 弧轴承轴系的径向回转精度可达士 $(0.020\sim0.025)\mu\text{m}$,径向刚性为 $0.035\sim0.040\mu\text{m}/\text{N}$ 。这种轴承已用于度盘检查仪、码盘光电检验仪、圆分度检验仪和光电圆刻机等精密设备上。经历了 6 年至 22 年先后不等的使用考验,证明这种轴系精度高、稳定可靠、双周误差基本消除。V 弧轴承轴系主要应用在恒速转动的仪器上,在“间歇”转动工作状态下的精度和性能,如应用于测角仪,尚待进一步研究和试验。

V 弧轴承常用四种设计布局,见图 2.3。

第一种 V 形轴承,如图 2.3(a),轴套由三个平面构成,其中两块连成一个 V 形块,第三块正对此 V 形块的角平分线,主轴在三平面中转动。第二种如图 2.3(b),轴套由三段圆柱面构成,其中两段圆柱面具有共同的中心 O_2 ,形成了特殊的圆弧 V 形块,第三段圆柱面正对着 V 形块的角平分线并具有圆心 O_1 ,主轴在这三段圆柱面中转动,其圆心 O 介于 O_1 及 O_2 间,但 $\overline{OO_1}\neq\overline{OO_2}$ 。该结构中三段圆弧的角度分布是一个关键问题。图 2.4 列出了四种分布方案,并对它们的置中精度的方向性及适用情况作出说明。

结构参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
2α	120°	90°	60°	40°
2φ	60°	90°	120°	140°
β	45°	30°	20°	15°
2γ	90°	60°	45°	35°
示意图				
置中误差的方向性(以椭圆为例)				
适用情况	y-y 方向置中精度高,而 x-x 方向低	轴颈椭圆对 y-y 置中精度无影响	轴颈椭圆度对各方向置中精度影响相等	x-x 方向置中精度高,而 y-y 方向低

图 2.4 V 弧轴承设计布局与置中精度的关系

第三种布局如图 2.3(c),轴套也由三段圆柱面构成,但这三段圆柱面各具有不同的轴心线 O_1 、 O_2 、 O_3 ,主轴转动时其轴心线介于这三个轴心线之间,与这三轴心线的距离一般也不相等。第四种见图 2.3(d),轴套由三段圆锥面构成,并具有同一轴心线 O ,其中一

段置于另外两段的角平分线上,锥形主轴转动的轴心线和轴套轴心线重合。

V 弧轴承轴系的典型结构如图 2.5。

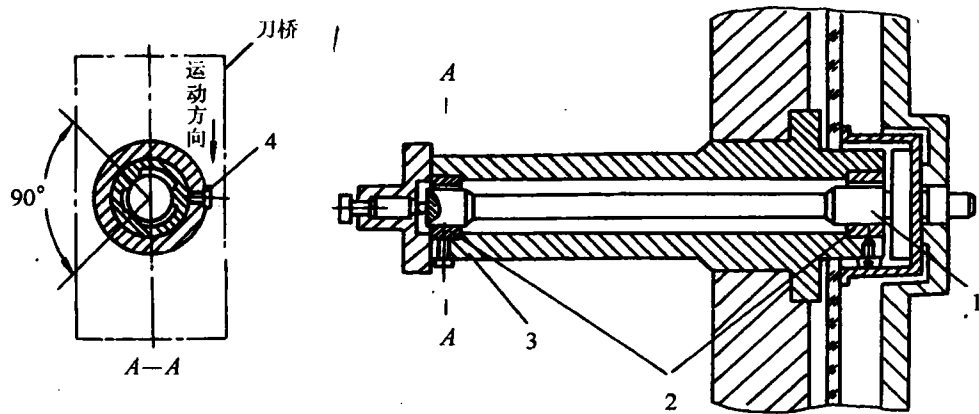


图 2.5 刻线机 V 弧轴承轴系

1 主轴;2 中间衬套;3 轴套;4 调整螺丝

图 2.5 是用第二种设计布局构成的实际轴系。轴套 3 内压入两个中间衬套 2,衬套按一定角度开槽,留出三段圆弧。其中一段圆弧相当于压块的作用,它的周围开沟槽,以调整螺钉 4 抵住,在顶丝锁紧力作用下,该弧可以微量变形压向主轴 1,精细调整此弧位置,使它和主轴恰好轻微接触。

从上例结构可以看出,本节所述轴承承重部分和定位部分是分开的,调整轴承的间隙时,轴承的轴向位置不会发生变化。轴承制造难点是工作间隙需减小到足够小的程度。更重要的,是靠精细调整来保证轴承的回转精度。轴承不仅具有较高的回转精度,而且具有较高的径向刚性,但须在恒温条件下使用,才能保证精度。

§ 2.2 密珠轴承轴系

2.2.1 密珠轴承的组成及结构实例

密珠轴承轴系是精密仪器常用的轴系结构,轴承的基本结构是由主轴、轴套和密集于二者之间具有过盈配合的滚珠所组成。滚珠的密集分布与过盈配合,有助于减小各组成件制造误差对轴心位置的影响,有利于轴系回转精度的提高。密集的滚珠按近似多头螺旋线排列,每个滚珠公转时沿自己的滚道滚动而互不重复,减少了滚道的磨损,使轴承的精度得以长期保持。滚珠的过盈相当于预加载荷,有效地增加轴承的刚度,通过微量的弹性变形消除轴承副的间隙。多滚道与过盈配合共同作用的结果,均化了轴套、主轴和滚珠的尺寸和形状误差,提高了轴系的回转精度。其径向回转精度在 $0.5\mu\text{m}\sim 6.1\mu\text{m}$ 范围内,虽然

低于空气和液体静压轴承,但不需要气源、净化、液压油源等辅助设备,故成本低且方便,从而在一些中、小型精密仪器中获得广泛的应用。

该轴承可以在轴系垂直与水平两种状态下使用,当轴系水平状态使用时,其回转精度略为下降。此外密珠轴承还具有结构简单,制造装配方便及对温度变化较不敏感等优点;但是对轴、套的不圆度及滚珠的不圆度和尺寸差都有较高的要求,制造工艺讲究,磨损后分解重装不易恢复原始状态,维修不便等缺点,在一些高精度仪器上其精度仍不能满足要求。

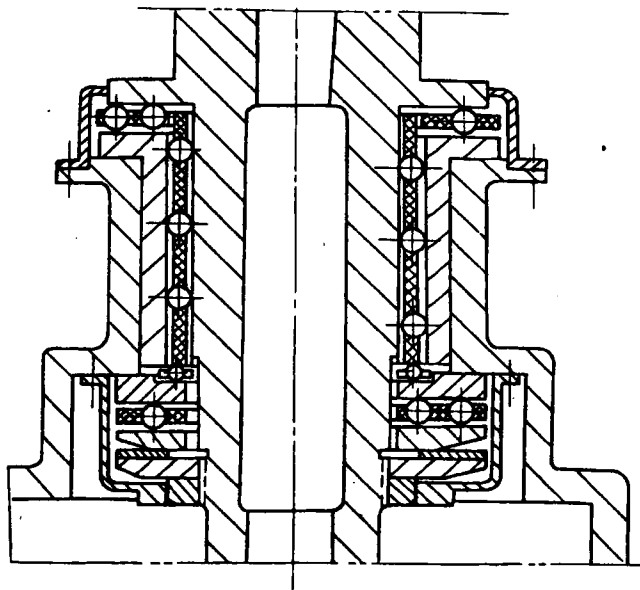


图 2.6 一种密珠轴承的结构

图 2.6 是用于惯性姿态敏感器测试台的密珠轴承结构图,径向滚珠共 108 粒,分成 16 排 7 列,即每排有 7 粒滚珠,主轴直径 60mm,滚珠直径 6.35mm,径向总的尺寸过盈量为 $3\sim 5\mu\text{m}$,径向滚珠隔圈的下端,用一圈小滚珠托起,以保证回转精度并减小隔圈的摩擦力矩。端面每一端有 48 粒 6.35mm 的滚珠,按圆弧线排列,轴向总的尺寸过盈量为 $5\sim 7\mu\text{m}$,端面滚珠隔圈亦有柱销支托,以防止附加的摩擦力矩。端面密珠下止推板的下方有薄弹簧钢片,通过压帽调整轴向预紧力。二套轴系的测试数据为:第一套,主轴轴颈不圆度 $0.1\mu\text{m}$,圆柱度 $0.6\mu\text{m}$,轴套孔不圆度 $0.4\mu\text{m}$,圆柱度 $1.6\mu\text{m}$,垂直度 $1.6\mu\text{m}$,滚珠不圆度 $<0.4\mu\text{m}$,尺寸差 $<0.4\mu\text{m}$,装配后轴承径向回转精度为 $0.26\mu\text{m}$,用特 7 号精密仪表脂润滑,摩擦力矩为 0.27Nm 。第二套,主轴轴颈不圆度 $0.24\mu\text{m}$,圆柱度 $0.7\mu\text{m}$,轴套孔不圆度 $0.3\mu\text{m}$,圆柱度 $3.8\mu\text{m}$,垂直度 $0.5\mu\text{m}$,滚珠数据相同,装配后径向回转精度 $0.14\mu\text{m}$,用 7106 光学仪器润滑脂,摩擦力矩为 0.15Nm 。

2.2.2 密珠轴承的设计要点

1. 隔离圈孔坐标设计举例

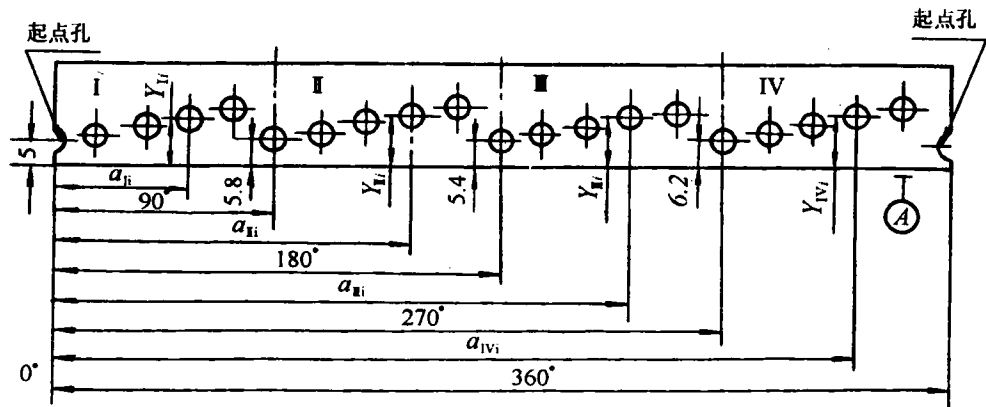


图 2.7 径向轴承隔离圈孔的排列

密珠轴承结构设计时,关键是合理排列滚珠的位置,适当选择滚珠的密集程度和过盈量。适当提高滚珠密集度可改善轴承回转精度,但过多的增加不仅使结构尺寸增大,而且摩擦力矩随之增大,影响轴系转动的灵活性。滚珠的排列原则为:各个滚珠的滚道互不重叠,在直径方向上滚珠保持对称性,滚珠的位置是靠滚珠隔圈保持的。滚珠排列就是隔圈的设计方案,图 2.7 是径向排列的例子,每个孔的位置以距起点孔的角度和距端面 A 的距离这两个参数来确定,若隔圈圆柱面上共 N 个孔 ($N=20$),则角度参数:在四个象限内按螺旋线排列,相当于四头螺旋线,即头数 $\eta=4$ 。直径方向有四颗对称分布的滚珠,两相邻孔中心线夹角 α 为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{N} = 18^\circ$$

距离参数:为了使直径方向的 4 颗滚珠的滚道互不重叠,这 4 颗滚珠相邻象限之间,在轴向应错开一个小距离 Δ ,取 $\Delta=0.4\text{mm}$,换算成同一螺旋线上的相邻滚珠的轴向距离间隔增量 k

$$k = \Delta\eta = 0.4 \times 4 = 1.6\text{mm}$$

端部距离常数 $l=5\text{mm}$,则各象限孔的中心坐标计算如下:

I 象限

$$j=0 \begin{cases} \alpha_{1j} = \beta j + \alpha_i \\ Y_{1j} = (l + j\Delta) + ki \end{cases}$$

式中 $i=0,1,2,\dots,m$, m 为一条螺旋线上的孔个数减 1,即 $m = \frac{N}{\eta} - 1 = 4$; $j=0,1,2,\dots,(\eta-1)$; 相邻螺旋线第一孔间夹角 $\beta = \frac{360^\circ}{\eta} = 90^\circ$; α_{1i} 为第 I 象限各孔中心角坐标值; Y_{1i} 为第一象限各孔中心距端部的轴向线坐标值。按上式计算第一象限各孔中心位置如下:

$$\begin{cases} \alpha_{10}=0^\circ, \alpha_{11}=18^\circ, \alpha_{12}=36^\circ, \alpha_{13}=54^\circ, \alpha_{14}=72^\circ \\ Y_{10}=5, Y_{11}=6.6, Y_{12}=8.2, Y_{13}=9.8, Y_{14}=11.4 \end{cases}$$

同理第 II 象限: