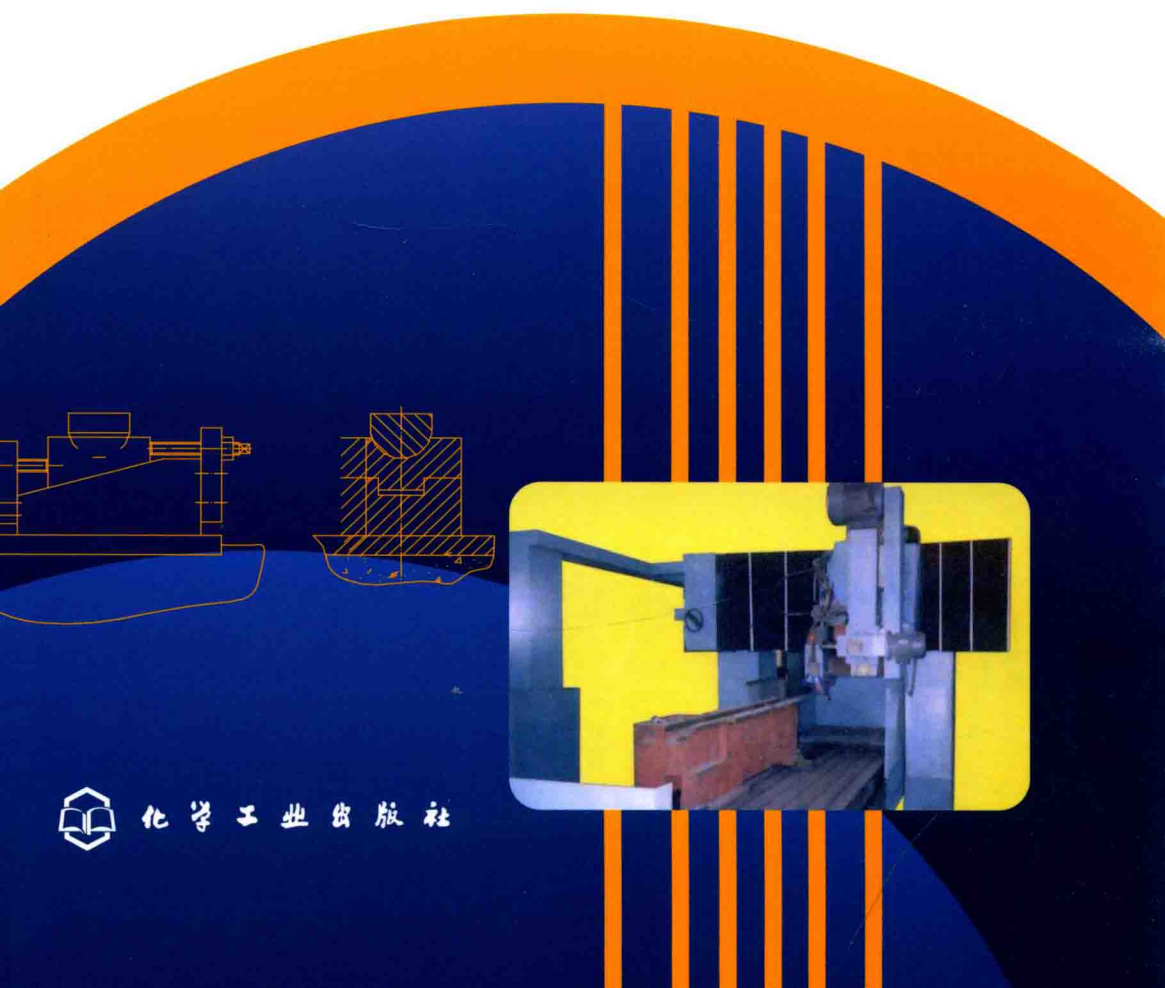


DAXING JINGMI JICHUANG
ZIZHUNZHI SHEJI YUANLI JIQI YINGYONG

大型精密机床 自准直设计原理及其应用

闫占辉 著



化学工业出版社

DAXING JINGMI JICHUANG
ZIZHUNZHI SHEJI YUANLI JIQI YINGYONG

大型精密机床 自准直设计原理及其应用

闫占辉 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地总结和阐述了目前热变形引起的加工误差的控制方法,机床床身导轨的自准直设计原理和设计方法,导轨磨床床身-基础系统的热态、静力和动力特性分析及其优化设计,地基稳定性试验和床身导轨自准直特性模拟考证试验等。

本书可供高等院校从事机械制造及其自动化和机械设计及理论等研究的师生阅读,也可作为机床设计、制造与装配领域的研究人员和技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型精密机床自准直设计原理及其应用/闫占辉
著. —北京:化学工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-122-23904-4

I. ①大… II. ①闫… III. ①高精度机床-设计
IV. ①TG502.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 094985 号

责任编辑: 廉 静
责任校对: 王素芹

文字编辑: 张燕文
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京科印技术咨询服务公司海淀数码印刷分部
710mm×1000mm 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 146 千字 2015 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言



20 世纪 30 年代德国阿亨工业大学 M. Weck 教授提出了机床热变形问题，拉开了机床热变形问题研究的序幕。之后，国内外研究人员对这一领域进行了大量研究，取得了丰富的成果。自 20 世纪 70 年代以来，计算机技术快速发展，控制系统理论不断发展，FEA 分析方法不断在工程中得到应用，数控机床热变形理论的研究不断丰富和发展，已经由定性分析不断向定量分析过渡，目前国内外研究人员正热衷于在线间接补偿精密机床热变形及采用新型材料改善机床结构方面的研究。但由于机床热变形问题的复杂性，使主动补偿技术在减小机床热变形的应用方面遇到了很大的困难。采用机床床身导轨自准直设计原理设计大型精密机床床身导轨，具有结构简单、精度高、不需控制装置等特点，成为研究控制机床热变形的一种新途径和新方法。

本书系统地总结和阐述了机床床身导轨自准直设计原理及其应用。全书共 5 章。第 1 章介绍了机床热变形的概念、控制原理及其技术发展现状。第 2 章根据土力学原理和混凝土材料的特性，分析了机床地基及基础相对稳定的客观原因，给出了条形基础与地基相互作用的力学模型。研究了混凝土基础温度随环境温度变化的规律及基础变形规律。提出了床身导轨自准直设计原理及其实现条件。研究了等截面梁与非等截面床身的自准直设计方法，给出了设计实例。第 3 章运用有限元方法对床身-基础系统的热态、静力和动力特性进行了系统的对比分析。第 4 章介绍了地基稳定性试验、床身导轨自准直特性模拟考证试验和自准直导轨磨床磨削加工试验。第 5 章列出了地基稳定性试验、床身自准直特性模拟考证试验、自准直导轨磨床磨削加工试验和环境温度变化测试的试验测量数据，并给出了数据处理结果。

本书研究内容曾分别以论文的形式发表在《Chinese Journal of

Mechanical Engineering》、《机械工程学报》、《中国机械工程》、《光学精密工程》、《吉林大学学报（工学版）》等科技学术期刊上，得到了国家科技部火炬计划项目的资助。本书总结了作者近年研究成果和攻读博士期间所做工作。对吉林大学于骏一教授和吉林省机电研究设计院曹毅高级工程师的指导，在此表示深深的谢意！

在本书的撰写过程中，参阅了国内外许多学者的著作、论文和研究报告等，特此对其作者表示衷心的感谢。

限于作者的学术水平，本书在内容、见解和观点等方面难免有不足和疏漏之处，衷心期望各位专家和读者不吝指正。

闫占辉

2015 年 1 月于长春工程学院

第 1 章 绪论

1

- 1.1 概述 1
- 1.2 机床热变形国内外研究现状 3
 - 1.2.1 机床热变形机理及热变形数学模型 3
 - 1.2.2 机床热变形测试 7
 - 1.2.3 接触面热阻对机床热变形影响的研究 8
 - 1.2.4 减小机床热变形的途径 9
- 1.3 导轨磨削与导轨磨床国内外研究现状 19
- 1.4 导轨磨床导轨的结构及特点 23
 - 1.4.1 对导轨的要求 23
 - 1.4.2 导轨的种类和特点 24
 - 1.4.3 导轨磨损量对加工精度的影响实例 28
- 1.5 本书主要内容 29

第 2 章 机床床身导轨自准直设计原理和设计方法

31

- 2.1 地基变形及其稳定性 31
 - 2.1.1 地基变形与地基应力 31
 - 2.1.2 地基处理 34
- 2.2 机床基础的变形及其稳定性 35
 - 2.2.1 机床基础的形式 35
 - 2.2.2 影响基础变形的因素 36
- 2.3 环境温度变化对机床基础变形规律的分析 38
 - 2.3.1 机床基础温度分布规律的理论分析 38
 - 2.3.2 机床基础变形规律的理论分析 40
- 2.4 温度变化对机床床身精度的影响 44

2.4.1	床身通过垫铁与基础固接时环境温度变化对床身精度的影响	44
2.4.2	床身通过垫铁浮放在基础之上时摩擦热对床身精度的影响	46
2.5	导轨磨床床身导轨的自准直设计原理和设计方法 ...	48
2.5.1	消除或减少环境温度变化对导轨磨床床身导轨几何精度影响的方法	48
2.5.2	床身导轨自准直设计原理	50
2.5.3	等横截面梁的自准直设计方法	51
2.5.4	非等横截面床身的自准直设计方法	54
2.6	导轨磨床床身导轨爬行的临界速度确定	57
2.6.1	数控机床运动部件爬行机理	57
2.6.2	数控机床运动部件爬行力学模型及微分方程 ...	58
2.6.3	数控机床运动部件爬行临界速度	59
	本章小结	60

第3章

导轨磨床床身-基础系统热态特性和力学特性分析及其优化设计

62

3.1	概述	62
3.2	导轨磨床床身-基础系统热态特性分析	63
3.2.1	机床基础沿高度方向的温度分布	63
3.2.2	导轨磨床床身-基础系统纵向弯曲刚度对床身导轨热变形的影响	64
3.3	导轨磨床床身-基础系统静力特性分析	68
3.3.1	导轨磨床床身-基础系统刚度	68
3.3.2	导轨磨床床身-基础系统静力特性模型的建立及其有限元分析	69
3.4	导轨磨床床身-基础系统动力特性分析	72
3.4.1	进行导轨磨床床身-基础系统动力特性分析的目的	72
3.4.2	导轨磨床床身-基础系统动力特性模型的建立及其有限元分析	72
3.5	自准直导轨磨床床身及基础有限元优化设计	78

3.5.1 有限元优化设计的一般步骤	78
3.5.2 自准直导轨磨床床身有限元优化设计	79
3.5.3 自准直导轨磨床基础的有限元优化设计	83
3.5.4 自准直导轨磨床床身-基础系统优化结果 分析	85
本章小结	86

第4章 试验方法与试验装置

87

4.1 地基稳定性试验	87
4.1.1 地基稳定性试验原理	87
4.1.2 试验方案	87
4.1.3 地基模型及地基变形检测	90
4.2 床身导轨自准直特性模拟考证试验	92
4.2.1 床身模拟件	92
4.2.2 床身模拟件温度场分布公式的推导	93
4.2.3 床身模拟件的热态特性分析	96
4.2.4 试验装置	100
4.2.5 床身模拟件变形测点布置和变形测量	101
4.3 床身导轨几何形状精度测量	101
4.3.1 用自准直仪测量导轨的直线度	102
4.3.2 用水平仪检测两导轨间的平行度	104
4.4 环境温度变化对床身-基础系统温度分布影响 试验	105
4.4.1 实验室内温度沿高度方向分布试验	105
4.4.2 基础温度沿高度方向分布试验	106
本章小结	106

第5章 试验结果分析

108

5.1 地基稳定性试验结果分析	108
5.2 床身导轨自准直特性模拟考证试验结果分析	115
5.3 自准直导轨磨床磨削加工试验结果分析	117

5.4 环境温度变化的测试结果分析.....	121
5.4.1 实验室内温度分布的测试结果分析.....	121
5.4.2 基础温度分布的测试结果分析.....	122
本章小结	124
参考文献	125

第 1 章

绪 论

1.1 概述

大型精密机床是主要采用切削或磨削或特种加工方法加工大型工件，使之获得所要求的几何形状、尺寸精度和表面质量的机床，经过不断改进，其形式和种类不断增加。目前，机械零件仍主要依靠切削加工，从而达到设计的加工精度和表面质量。金属切削机床的精度及其保持性，不但与它的静态特性相关，也与它的动态特性相关，还与它的热态特性相关。美国劳伦斯·利弗摩尔国家实验室 J. Bryan 教授于 20 世纪 90 年代在“International Status of Thermal Error Research”报告中指出，“自从 20 世纪中叶发表有关机床与热关系方面研究工作以来，尽管研究成果逐渐丰富，但在生产实践中的应用非常少见。此后，计算用计算机、激光干涉仪、精密加工用的金刚石机床，以及具有快速误差自动补偿功能的检测设备已经出现，并且误差补偿能力不断提高，但是由于热变化引起的热变形，一直是引起降低加工精度误差，降低设备精度保持性的主要因素；一般地，机床热变形引起的加工误差，占全部加工误差总和的 40%~70%。”RWTH Aachen 大学 M. Weck 教授在他的研究成果中提到，“热变形研究的重点是降低机床结构对热和热传导敏感性。”随着检测尺度的不断提升，纳米技术在工业中的广泛应用，对精密加工精度的要求越来越高，机床热变形问题迫切需要解决。因此，机床热变形问题一直是精密及超精密加工等领域的重要基础理论问题之一，至今，国内外很多机械制造人员开展机床热变形方面的基础理论和控制策略等方面的基础研究和应用研究。

20 世纪 30 年代，瑞士研究者针对精密坐标镗床的热变形开始研究，20 世纪 70 年代前，研究者对精密机床热误差的分析，只能限于分散的、定性

的,而不是定量的分析。20世纪70年代后,随着计算机技术、FEM技术和测试方法与手段的不断进步,机床热变形的研究工作逐渐由定性分析过渡到定量分析,与实际工况越来越接近。特别是在机床热变形基础理论、测试手段和机床结合面及其热传导等方面开展了许多研究,提出了一些减小精密机床热变形的控制策略,比如采用热流检测与热流控制技术、重新设计机床结构、采用新型功能材料和机床热误差检测与反馈补偿等方法,经实际工程应用和生产实践,控制效果较好,热误差减小明显,达到了降低机床热变形的目的。

大型精密机床加工精度影响因素较多,但主要受机床主轴回转精度、机床工作台及床身导轨面的几何精度及其精度保持性的影响,而以上机床大型零部件的几何精度及其精度保持性主要取决于加工床身导轨所用导轨磨床的加工精度及毛坯热处理水平。大型精密导轨磨床经安装和调试后,它的加工精度除了与它装配时的装配精度相关,机床内外热变化对加工精度的影响也十分显著。重庆大学胡立德等采用某机床厂生产的导轨磨床加工 M1420 外圆磨床床身导轨,并采用导轨精密磨削微机补偿控制方法补偿,由于环境温度变化引起床身 V 形导轨在垂直面内的直线度误差达 $8.4\mu\text{m}/1000\text{mm}$ 。

为了提高大型精密磨床的磨削精度及其精度稳定性,降低环境热变化对大型精密磨床精度的影响程度,现在一般采取:实时补偿热误差;将精密导轨磨床置于独立的、基本恒温的车间;提高大型精密导轨磨床基础及床身的弯曲刚度。由于大型精密导轨磨床基础及床身的弯曲刚度提高一般要通过增加材料、改变截面结构来实现,因此提高弯曲刚度的幅度不是无限的,只能减小而不能消除热变形。置于普通车间的大型精密导轨磨床,在从秋季向冬季过渡,或从冬季向春季过渡时,由于机床的混凝土基础、床身及其导轨的热影响较大,一般需定期重新调整机床基础上的垫铁和床身,以便保证床身导轨的精度。定期调整机床基础上的垫铁和床身,保证床身导轨几何精度是一项技术含量高、工作难度大、工作时间长的工作,不仅耽误企业生产的正常进行,而且不能长时间保持机床的精度性。将导轨磨床放置在独立的、相对恒温的车间,虽然可以明显降低热变形量,但是由于需保持相对恒温状态,将显著提高制造成本。作者对某一置于独立的、相对恒温车间,瓦德里希-科堡公司生产的 30-15S4030 型精密导轨磨床的温控费用进行了粗略计算,每年需人民币 7 万余元。采用热误差在线补偿装置补偿加工系统热变形量是研究的热点和重点之一,但主要存在安装、调试要求高,数据处理和闭环控制响应时间长,环境条件要求高等缺陷,目前在实际生产中应用较少。

是否有更好的解决方法?作者经过长期对热误差对大型精密机床影响规

律的反复探索,提出了一种通过合理减小大型数控导轨磨床床身及其混凝土基础纵向弯曲刚度的方式控制周围环境温度变化引起导轨磨床加工精度降低的新方法,并设计、制造了一台采用自准直设计原理的导轨磨床,尽管一直就安装在一个普通环境的车间内加工零件,该机床精度及精度的保持性几乎不变,换季时也不需要再次调整机床床身和导轨。与国内外其他厂家生产的、相同规格的导轨磨床相比,新型自准直导轨磨床的重量减少了75%,刚度减小了很多,机床导轨直线度精度及精度的保持性可达到国内外公认产品——德国瓦德里希-科堡公司生产的数控导轨磨床的技术水平,有关数据参见表1-1。

表 1-1 新型自准直导轨磨床与其他同类产品的对比

相比较产品	规格 $b \times l / \text{m}$	导轨直线度 (垂直面内) $\delta_1 / \text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	导轨直线度 稳定性 $\delta_2 / \text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	相对重量比 $k_w / \%$	相对价格比 $k_p / \%$
Waldrich Coburg 公司生产的导轨磨床	1.6×6.0	0.005	0.012	130	476
国内现生产的导 轨磨床	1.6×4.0	0.005	0.012	100	100
新型自准直导轨 磨床	1.25×4.00	0.003	0.005	25	25

1.2 机床热变形国内外研究现状

机床热变形问题从20世纪30年代开始研究。为适应不断提高制造精度的要求,热变形对机床精度的影响日益引起人们的重视,20世纪30年代至40年代以从改变机床机械结构出发减小机床热变形,从此开始从试验的角度,分析机床热变形产生的原因,逐步形成了有关精密机床热变形的基本知识。但受当时试验条件的限制,研究工作进展十分有限,还不能达到定量分析和准确试验研究的程度。近几十年来,在国内外,研究人员着重针对机械结构热问题产生的机理、机床热变形检测与分析、机床接触面热效应等对机床热变形的影响开展系统的研究,逐步找到了影响机床热变形的因素,并从实际应用的角度寻求解决途径。

1.2.1 机床热变形机理及热变形数学模型

20世纪60年代,H. Fisher同G. Spur共同研究了机床热来源与机械精

度之间的数学模型，其基本结论是：机床热变形产生主要在于机床运动时产生的热量传播后，会产生非均匀的温度场，进而机床不同位置的变形大小不一，从而导致机床固定件的位置相对原来位置的移动，最终引起零件加工精度不稳定。20 世纪 70 年代，国外知名研究人员垣野义昭发现，当加工零件时，引起机床热变形的热源不少，详细划分见图 1-1。在图 1-2 中，作者从热变形的来源来阐述机床热变形的影响过程：机械零部件和加工工件都有一定的热容量，温度变化，导致热容量变化，同时热容量的传递具有时间滞后效应，机床热变形是随着材料的变化、不同的温度区间及其他环境等随时间逐渐变化的。

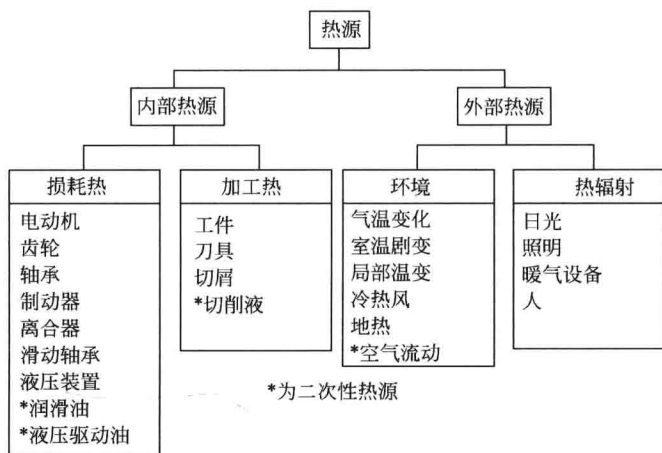


图 1-1 导致机床产生热变形的热源

20 世纪 70 年代，日本东京大学佐田登志夫教授和助手吉田良在他们的研究工作中首次提出“热刚度”一词，并论述了热变形与热刚度之间的关系，提出机床结构变形不是单一因素的影响，其对加工精度影响具有综合性和复杂性。从此，人们在研究机床变形时，常常将静变形（静刚度）、振动幅值（动刚度）和热变形（热刚度）统一起来，综合分析和研究机床静刚度、动刚度和热刚度对机床精度和对工件加工精度的影响。

20 世纪末以来，国内外研究人员大都针对机床热变形产生原因，从机床热变形敏感部位温度变化与热变形量之间耦合关系建立可靠性模型开展研究。1999 年，韩国学者 Won Soo Yun 从高精度数控车床伺服进给装置丝杠、螺母与滚动体摩擦引起的机床热变形，对数控机床用丝杠和基础件导轨建立各自的数学模型。在加工工件时，一般不容易检测丝杠-滚动体-螺母滚动处的每一点的温度，一般常简化处理丝杠-螺母，建立简化后的热传导数

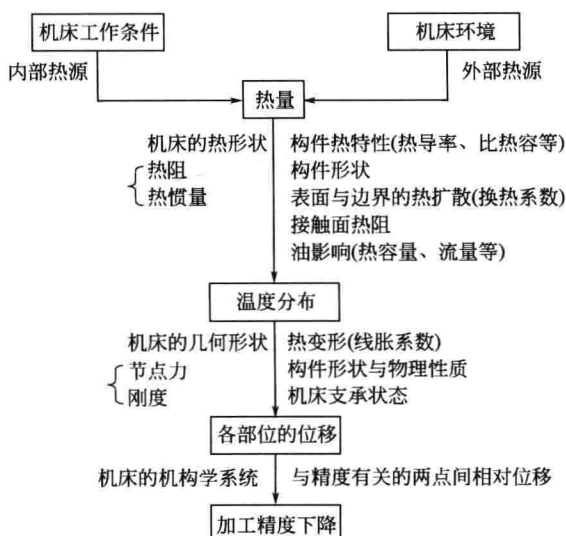


图 1-2 机床热变形的机理

学方程，然后再通过系数进行误差补偿，进而得到丝杠-滚动体-螺母温度场实时分布，最后综合利用神经网络、遗传算法或小波变换等数据处理方法求出热变形的大小。对于相对简单的滑动摩擦，摩擦副之间摩擦引起热变化，导致温度场重新分布及引起的热变形可采用 FEA 方法求得，摩擦副之间的边界条件可通过测量摩擦副敏感点的温度值获得，最后通过试验验证所建立的模型是否正确。1999 年，国外研究人员 M. H. Attia 采用频域反向求解法，初步得到热源对机床敏感件施加的热能，即在离线情况下，通过理论公式推导出作用在机床敏感件的热量 $q(\tau)$ 与热源附近两点温差 $\Delta t(\tau)$ 之间的传递函数 $\Delta t(s)$ ，通过公式 $Q(\tau) = L^{-1}[G^{-1}(s) \cdot \Delta t(s)]$ 求得机床热源在单位时间间隔内的放热。此外，M. Weck 和 L. Zangs、E. R. McClure、Y. Yoshida 和 F. Honda 等也在机床热变形与温度分布的关系方面做了大量的研究工作。

1996 年，欧盟为保持自身在科学技术和制造业的霸主地位，组织知名大学和大型企业，如比利时鲁文大学、德国阿亨工业大学、DOIMAK 数控磨床公司、西班牙 ZAYER 数控铣床公司、西班牙工业研究中心和意大利三坐标测量机公司等单位研究数控设备热影响的基础理论和变形规律，并从实际应用角度探求减少或消除热变形的途径。他们研究的主要成果如下。

① 数控机床热影响与机床局部点的温度变化相关，特别与机床整体的温度动态时变相关。

② 对于机床温度变化引起的机床热变形,可采用非线性回归方程、小波变换及神经网络等建模方法建立模型。

③ 目前,减小机床热变形的有效方法主要包括:设计有利于消除或减小热变形的机械结构,隔离产生热的热源,热平衡发热元件和在线检测温度与变形补偿。

④ 三坐标测量机所处环境对三坐标测量机等精密检测设备的精度影响极大;三坐标测量机的台面结构、导轨形式对设备热变形的影响也很大。

国内从 20 世纪 60 年开始研究机床热误差,浙江大学、上海机床厂和北京机床研究所等高校、企业和研究机构最早在机床热变形研究方面做了很多工作。浙江大学梁允奇教授是我国较早开展机床热变形基本理论问题研究的学者之一,1982 年他主持出版的高校统编教材《机械制造中的传热与热变形基础》是国内率先全面、系统地论述机床热变形的资料,书中详细论述了有关热变形的基本概念、热源及热传导、热与热变形等基本理论和方法,做了大量基础性工作,为后来进一步研究机床热变形问题提供了很好的借鉴。清华大学项伟宏等研究了 TH6350 卧式镗铣高速加工中心主轴热行为,通过相关与非相关分析,目的是筛选出影响很小的参变量,同时建立多因素非线性回归分析模型,计算出加工中心主轴热变形。非线性回归分析计算值与加工中心主轴热变形实际测量值对比分析得出,所建立的多因素非线性回归分析模型与加工中心主轴热变形实际测量值基本一致。

就如何保持数控机床热变形抗变换性(鲁棒性),上海交通大学杨建国等提出了一种针对鲁棒性机床热变形建模方法,它借鉴了传统建模方法,所开发的温度采集系统,能减小或消除白噪声对模型参数的影响,保证基于新建模型开发的温度采集系统干扰最小。

目前机床热变形数学模型可分为经验模型和数值模型。基于经验模型建立的数学模型主要是:通过实验分析法和多变量线性或非线性回归法建立数控机床敏感点的温度,及其对应点的热变形值,并建立自变量和因变量之间的关系表达式。数值模型建立方法主要采用小波分析、神经网络分析法、FEA 法建立机床温度场与热误差之间的表达式。经验模型的缺点是温度测量点数量有限,温度传感器的数量合理值和位置的选择难以优化;数值模型由于分析方法复杂,可能导致计算时间长,采用 FEA 法存在边界条件不易确定,不易在在线补偿机床热变形中实际应用。加拿大学者 M. H. Attia 提出的 GMM 法(Generalized Modelling Methodology)具有数值计算效率高、数值模拟精度高等优点,是研究机床热变形理论和应用的一种新方法。

1.2.2 机床热变形测试

(1) 机床温度场测试仪器

检测数控机床热变形区域温度的仪器可分为接触式和非接触式两种类型。接触式测温仪器主要包括半导体点温计、热敏电阻、热电偶、贴附式温度计和棒状温度计；非接触式测温仪器主要包括红外线热像仪和点式热像计。

棒式温度计的原理是玻璃管内液体热胀冷缩。一般有水银温度计和酒精温度计两种。可用于机床循环油、冷却液及周围环境温度的测试。贴附式温度计是将一块导热性能好的金属块套在棒状温度计的液体泡的一端，主要用于测量机床表面的温度。

上述两种温度测量仪器使用方便，其测量精度可达 0.2°C ，主要用于测量固定测量点的温度。

由 NiO 、 MnO_2 等粉末按一定比例烧结而成的热敏电阻，依据电阻大小随着温度的升高而下降的特性设计。热敏电阻测温灵敏度高，可以达到 0.002°C 左右。在实际检测物体温度时，在热敏元件的外部需要布置保护层，这样就降低了它的测量精度。所以，它主要用于粗略测量数控机床敏感部位的温度。

热电偶温度计基于热电偶材料的热电效应制成。常用的热电偶材料为铜-康铜、铜-铁、铝-铬、白金-铂铑等。用热电偶测量温度灵敏度高，使用方便，在国内外机床测试中广泛采用，其测量精度可达 0.05°C 。

红外线热像仪接收发热体发出的红外线热量，经内部处理后显示物体的温度。吉林大学热工实验室购买的日本航空株式会社生产的 TVS-2000 型红外线热像仪，其温度测量范围达 $-40\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ， 2000°C 时的测量精度可达 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ，该仪器具有连续监测整台机床的温度变化的功能。采用热像仪拍摄的热像图，可以清楚、全面地看到所监测部位的温度分布情况和各点温度大小，目前红外线热像仪的精度可达 0.05°C 。图 1-3 为西安交通大学赵汝嘉教授使用瑞士生产的 AGA780SW 远红外热像仪，测量 ZOO3/1007 三坐标测量机龙门框架温度场分布情况拍摄的图片。

(2) 机床热变形测量仪器

机床热变形测量仪器有接触式和非接触式两种。接触式热变形测量仪主要有电感测微仪、千分表和水准仪。非接触式热变形测量仪主要有激光干涉仪、电涡流传感器、气动测微仪、电容式传感器和全息照相装置等。激光干涉仪 (laser interferometer) 的测量精度高达 $0.01\mu\text{m}$ ，目前国内外已广泛

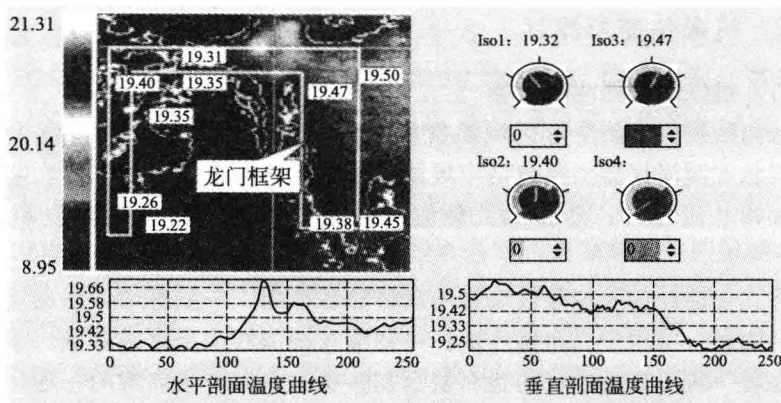


图 1-3 ZOO3/1007 三坐标测量机龙门框架温度场分布

使用激光干涉仪测量机床热变形。

1.2.3 接触面热阻对机床热变形影响的研究

机械设备零部件之间，无论是固定接触面和滑动接触面，它们的接触刚度大小不一，零部件接触面的热阻大，零部件接触面区域的热变形显著。20 世纪 70 年代，加拿大 M. H. Attia 教授最先分析接触面与机床热变形之间的关系，在机械工程领域知名杂志《Annals of the CIRP》上发表了题为“On the role of fixed joints in thermal deformation of machine tool structure”一文，在文中引出“接触面”的概念，研究了接触面实际状态的基本情况，及其如何影响热变形，而机械零部件接触面的热变形又通过接触面处形成的热应力，反过来影响接触面的形态。图 1-4 为接触面处于普通接触状态（不完

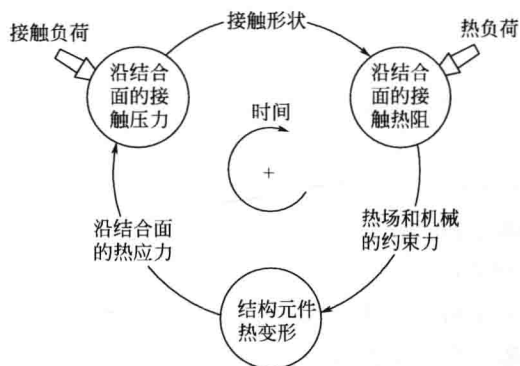


图 1-4 接触面闭环相互作用示意图