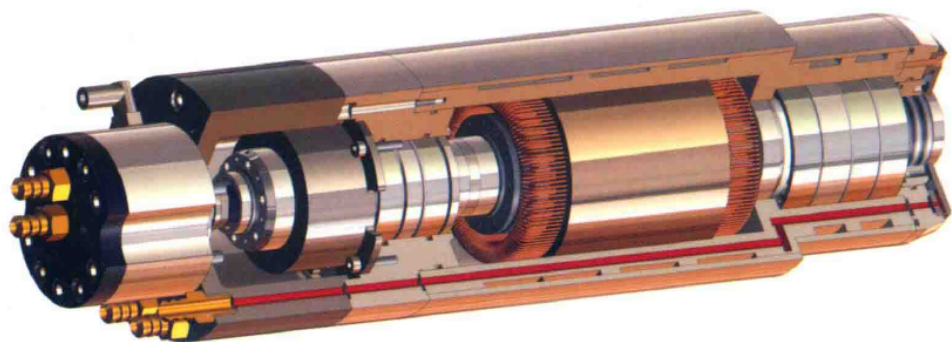




高速精密电主轴

仿真关键技术研究

GAOSU JINGMI DIANZHUZHOU
FANGZHEN GUANJIAN JISHU YANJIU

何强 李安玲 ○ 著 张勇 ○ 主审



华中科技大学出版社

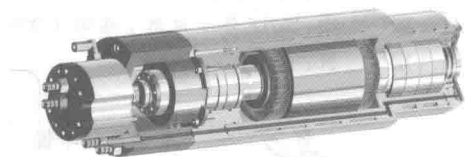
<http://www.hustp.com>

高速精密电主轴

仿真关键技术研究

GAOSU JINGMI DIANZHUSHOU
FANGZHEN GUANJIAN JISHU YANJIU

何强 李安玲 ◎ 著 张勇 ◎ 主审



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书基于 ANSYS 有限元、MATLAB 分析和 SolidWorks 三维建模等软件,在了解电主轴结构的基础上,重点介绍了电主轴的静态特性、动态特性、热态特性和其冷却系统仿真分析过程,力求紧扣操作、步骤方法清晰。同时结合适量电主轴实例仿真,本书向读者系统地展示了电主轴的仿真分析思路、方法和技巧。

本书内容与工程实际和科研紧密结合,既可作为大中专机械类专业和相关培训机构的教材,也可作为机床主轴类设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高速精密电主轴仿真关键技术研究/何强,李安玲著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5680-3391-6

I. ①高… II. ①何… ②李… III. ①数控机床-主轴-系统仿真-研究 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 289132 号

高速精密电主轴仿真关键技术研究

Gaosu Jingmi Dianzhuzhou Fangzhen Guanjian Jishu Yanjiu

何 强 李安玲 著

策划编辑:刘 静

责任编辑:刘 静

封面设计:抱 子

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913
邮编:430223

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:13

字 数:258 千字

版 次:2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:35.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前

言

电主轴作为高速精密数控机床的关键功能部件,具有结构紧凑和质量轻的优点,且我国高档数控机床及其关键功能部件的设计制造列入了国家“十五”和“十一五”发展规划,所以对电主轴的研究越来越重要。本书系统地研究了电主轴的仿真分析思路、方法和技巧。通过学习本书,可极大地提高机械工程师的设计仿真效率,最大限度地挖掘工程师的创造力。

本书基于 ANSYS 有限元、MATLAB 分析和 SolidWorks 三维建模等软件,结合电主轴三维设计及仿真分析,在 7 章篇幅里依次介绍了国内外电主轴仿真分析现状,电主轴的设计思路及关于其静态特性、动态特性、热态特性和流体特性的仿真分析。本书介绍了 ANSYS、MATLAB 和 SolidWorks 等软件在电主轴研究中的应用,重点介绍了电主轴的仿真分析方法和过程,力求紧扣操作环节,语言简洁,避免了冗长的解释说明,使读者能够快速了解电主轴的仿真分析方法和步骤。在仿真分析过程中,通过适量的电主轴综合实例操作,向读者系统地展示了电主轴的仿真分析思路、方法、过程和技巧。

本书内容翔实,与实际紧密结合,条理清晰,讲解详细,既可作为大中专院校机械类专业和相关培训机构的教材,也可作为机床主轴类设计人员的参考书。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2017 年 12 月

第 1 章 绪论	(1)
1.1 国内外电主轴仿真技术研究现状	(1)
1.1.1 电主轴主轴的静态特性仿真	(1)
1.1.2 电主轴的动态特性仿真	(3)
1.1.3 电主轴的热态特性仿真	(7)
1.1.4 电主轴的流场特性仿真	(13)
1.2 小结	(25)
第 2 章 高速电主轴结构分析	(27)
2.1 内置电机	(27)
2.2 轴承	(28)
2.2.1 轴承的选择	(29)
2.2.2 轴承的配置形式	(30)
2.2.3 轴承的预紧	(31)
2.2.4 轴承静刚度的简化计算	(33)
2.3 主轴	(34)
2.3.1 主轴材料的选择	(34)
2.3.2 主轴的刚度分析	(34)
2.3.3 主轴的热处理	(34)
2.3.4 电机转子与主轴过盈量分析	(35)
2.3.5 主轴的动平衡分析	(37)
2.3.6 主轴的临界转速分析	(38)
2.4 润滑系统	(39)
2.5 冷却系统	(41)
2.5.1 电主轴的散热分析	(41)

2.5.2 电主轴的螺旋冷却水道分析	(41)
2.6 小结	(42)
第3章 静力学仿真分析	(43)
3.1 主轴静力学仿真	(43)
3.1.1 优化模型的建立	(43)
3.1.2 仿真结果	(44)
3.2 轴承的静力学问题	(48)
3.2.1 接触问题与单元类型	(49)
3.2.2 弹性接触问题基本方程	(51)
3.2.3 接触问题解析解	(51)
3.2.4 有限元模型建立	(52)
3.2.5 网格划分与接触对定义	(53)
3.2.6 约束边界条件与外载荷	(54)
3.2.7 求解设置	(57)
3.2.8 计算结果及分析	(57)
3.3 小结	(61)
第4章 高速电主轴主轴动力学	(62)
4.1 邓柯莱法临界转速估算	(62)
4.1.1 均匀质量轴的临界转速计算	(63)
4.1.2 带圆盘不计轴自重时轴的一阶临界转速计算	(64)
4.1.3 实例计算	(64)
4.2 主轴动态仿真分析	(67)
4.2.1 主轴转子-轴承系统运动微分方程	(67)
4.2.2 主轴模态分析	(68)
4.3 主轴谐响应分析	(68)
4.4 高速磨床电主轴主轴动力学仿真	(69)
4.5 ANSYS 中的加载与求解	(71)
4.6 试验研究	(73)
4.6.1 静态锤击法	(73)
4.6.2 动态试验法	(74)
4.7 结果与分析	(76)
4.8 松拉刀电主轴主轴动力学仿真	(76)
4.8.1 电主轴结构	(76)
4.8.2 电主轴主轴动态性能分析	(78)



4.9 小结	(82)
第5章 高速电主轴轴承动态仿真分析	(83)
5.1 球轴承和非线性动力学理论基础	(83)
5.1.1 球轴承的结构特点	(83)
5.1.2 球轴承的基础理论	(86)
5.1.3 非线性动力系统基本理论	(88)
5.2 高速电主轴轴承非线性动力学分析	(94)
5.2.1 滚动轴承受力分析	(95)
5.2.2 轴承径向游隙变化下的系统动力学分析	(99)
5.3 基于 LS-DYNA 的轴承动力学分析	(108)
5.3.1 LS-DYNA 简介	(108)
5.3.2 LS-DYNA 的方程	(109)
5.3.3 LS-DYNA 有限元显式算法	(110)
5.3.4 混合陶瓷球轴承动力学分析	(110)
5.4 小结	(124)
第6章 高速电主轴的传热分析与温度场数学模型	(125)
6.1 传热的基本类型	(125)
6.1.1 热传导	(125)
6.1.2 热对流	(125)
6.1.3 热辐射	(126)
6.2 电主轴的传热机制	(126)
6.2.1 高速电主轴的热源及发热量分析	(127)
6.2.2 高速电主轴的传热分析	(130)
6.3 温度场计算的有限元法	(134)
6.3.1 傅立叶定律	(134)
6.3.2 温度场的数学模型及边界条件	(134)
6.3.3 稳态传热	(136)
6.3.4 瞬态传热	(137)
6.4 高速电主轴的热态仿真分析	(137)
6.4.1 材料参数与边界初始条件	(137)
6.4.2 主轴的热力学分析	(138)
6.5 混合陶瓷球轴承的热分析	(140)
6.5.1 实体模型的建立及单元选择	(140)
6.5.2 边界条件	(141)



6.6 热态特性对电主轴系统动力学特性的影响	(143)
6.6.1 物理模型创建	(144)
6.6.2 数值仿真结果	(145)
6.6.3 电主轴的试验研究	(148)
6.6.4 改善电主轴热态特性的基本思路	(151)
6.7 小结	(152)
第7章 流场仿真分析	(153)
7.1 电主轴风场仿真	(153)
7.1.1 数值模拟模型	(153)
7.1.2 电主轴的试验研究	(159)
7.1.3 仿真结果与试验结果对比	(164)
7.2 电主轴水冷分析	(166)
7.2.1 最佳冷却系统的确定	(167)
7.2.2 热态特性仿真分析	(172)
7.2.3 试验验证	(176)
7.3 液体静压主轴仿真与试验验证	(181)
7.3.1 液体静压主轴结构	(181)
7.3.2 液体静压轴承的工作原理及结构	(182)
7.3.3 液体静压轴承的数学模型	(184)
7.3.4 液体静压轴承仿真分析	(187)
7.3.5 液体静压轴承试验验证	(191)
7.4 小结	(192)
参考文献	(194)

第 1 章 绪 论

高速精密数控车床及车削中心在汽车、航空航天、军工、电子、自动化等行业发挥着极为重要的作用。高速精密数控车床及车削中心成为国家重要的战略设备之一,但受国内数控系统、电主轴、直线电机等先进功能部件的性能制约,在速度和精度等两项指标上与国外的高速精密数控车床及车削中心差距较大,且其核心技术仍然掌握在发达国家的手中,已影响到国家行业战略安全。为了提高电主轴的质量和性能,加快高档数控机床的研发工作,解决高档数控机床发展中的“瓶颈”问题,提高我国制造业的国际竞争力,打破高档数控机床依赖进口的局面,实现电主轴关键技术突破,我们需要对电主轴仿真关键技术进行研究,而且,对电主轴仿真关键技术进行研究也是国内汽车、航空航天、军工、电子等国民经济重要行业领域的迫切需要。由此可见,对电主轴仿真关键技术进行研究具有科研价值、经济价值和社会价值。

本书基于使用 SolidWorks 三维建模、ANSYS 有限元和 MATLAB 分析等软件对电主轴的部分或整体进行建模和仿真分析,介绍了电主轴的静态、动态、热态、流场等特性,旨在为电主轴的设计、仿真分析提供依据。

1.1 国内外电主轴仿真技术研究现状

1.1.1 电主轴主轴的静态特性仿真

电主轴主轴的静态特性仿真主要是为了研究在一定外载荷的条件下,主轴设计参数对主轴刚度的影响,并在约束函数下,优化各设计参数使主轴刚度达到最大。

Kang Y 等建立了主轴-轴承的优化模型。图 1-1 所示的电主轴被相同的两个空气轴承支承。设主轴悬伸量为 a ,轴承宽度为 l_b ,内置电机转子宽度为 l_m (是根据电主轴的性能确定的基本参数)。电机的配置方式有电机后置(见图 1-2)和电机中间配置(见图 1-3)两种。实验证明,电机后置的挠度值 δ 比电机中间配置的挠度值 δ 小。在作用在主轴右端的集中载荷 F 的大小为 100 N 的情况下,改变轴承刚度(10^7 N/m, 10^8 N/m, 10^9 N/m)和主轴的材料(殷钢、Ni-Cr-Mo 钢),当轴承刚度为 10^7 N/m, 10^8 N/m 时,电机两种配置的跨度比 L/a 必须最大,当轴承刚度超过 10^9 N/m 时,小跨度比($L/a < 2.0$)比较好。在所有情况下,电机后置的静

态变形量都比电机中间配置的静态变形量大。

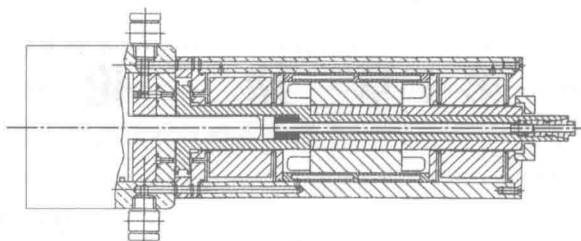


图 1-1 两相同空气轴承支承的电主轴

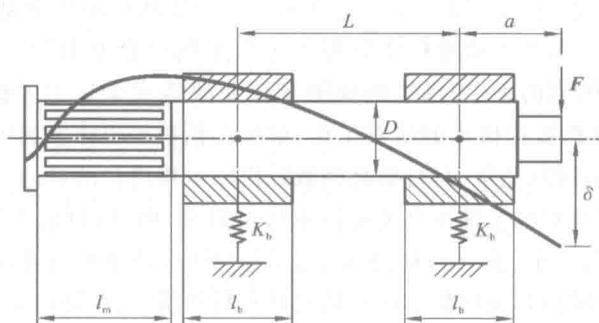


图 1-2 电机后置

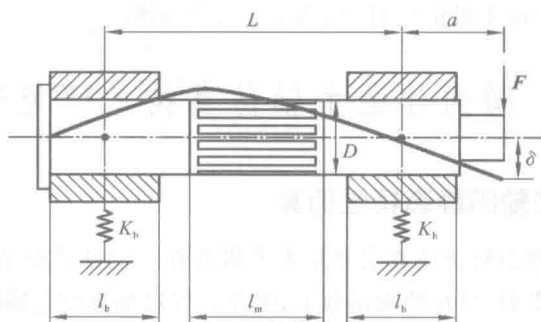


图 1-3 电机中间配置

郭维祺等以系统稳定性评价指标为优化目标,以电主轴系统轴向尺寸参数 L_1, L_2, L_3, L_4 (见图 1-4) 为设计变量,采用高效微型遗传算法实现高速静压内置式电主轴系统(见图 1-5)的稳定性优化。这种稳定性优化方法既能高效解决轴系稳定性优化问题,又可避免复杂结构参数修改。

周森等基于 Workbench 软件对加工中心主轴的静刚度进行研究。他们首先对实体模型进行简化:删除对分析没有影响或影响很小的微小特征,如用于螺栓连

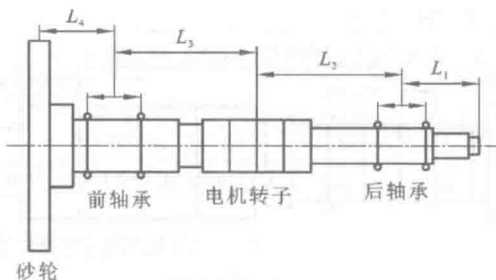


图 1-4 优化变量示意图

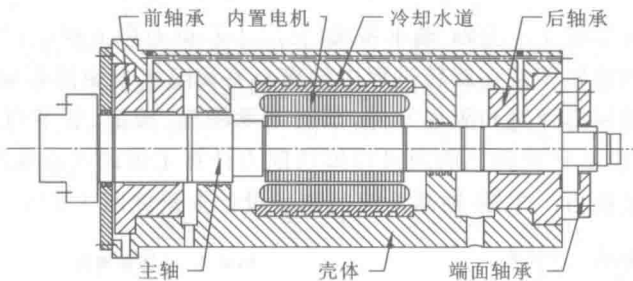


图 1-5 高速静压内置式电主轴系统

接的小孔,轴上的定位销、键槽;将前后各两个角接触球轴承串联起来构成的轴承组简化为一个支承,支点位置在接触线与主轴轴线交点的中点处;把轴承简化为能够径向压缩的弹簧,以弹簧刚度代替轴承刚度。然后,他们在静力学分析基础上,以主轴的质量为约束条件,以主轴悬伸量、跨距、主轴第一阶段外径以及主轴内径为设计变量,对主轴进行了静刚度优化设计。

1.1.2 电主轴的动态特性仿真

高速电主轴普遍存在可靠性低和突然失效等问题,这主要是由电主轴的设计、装配和工作环境引起的。为了确保电主轴具有稳定的工作性能,研究人员从不同方面利用各种方法来提高电主轴的动态特性。研究发现,电主轴的主轴结构、轴承预紧、离心力、陀螺力矩、轴承跨距以及电主轴工作过程中产生的热等对其动态特性有很大影响。对电主轴进行动态仿真就是为了预测电主轴的设计参数和工作条件对其动态特性的影响。

Lin C W 等说明了电主轴在整个设计过程中存在的设计问题,在电主轴的设计过程中有 8 个设计变量(见图 1-6),并通过一个有限元模型分析这 8 个设计变量的灵敏度,研究这 8 个设计变量对电主轴固有频率的影响程度,通过优化这 8 个设计变量将电主轴的固有频率提高到最大。

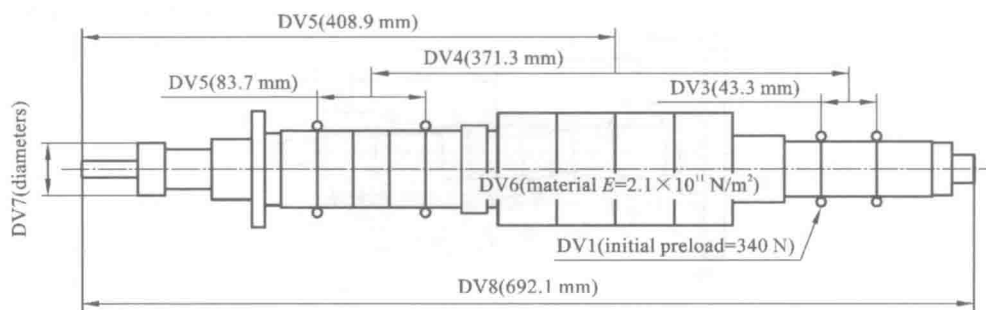


图 1-6 电主轴系统的设计变量

Y. Altintas 等建立了主轴-轴承系统(见图 1-7)的有限元模型(见图 1-8),考虑轴承的预紧力和旋转零件在旋转过程中的离心力和陀螺力矩的影响,定义主轴-轴承系统各节点的局部弹簧和阻尼元件,预测轴承刚度、振型、各节点的频率响应函数,并在电主轴制造和试验之前通过模拟切削力计算主轴的动态变形量、静态变形量和轴承上的接触力。主轴-轴承系统的初步设计变量如图 1-9 所示。

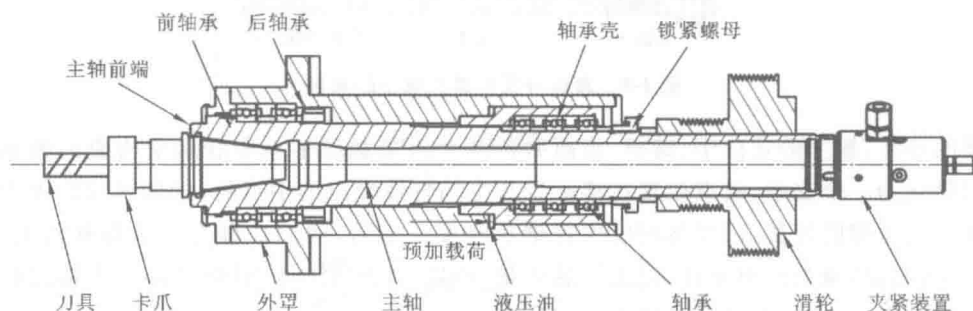


图 1-7 主轴-轴承系统

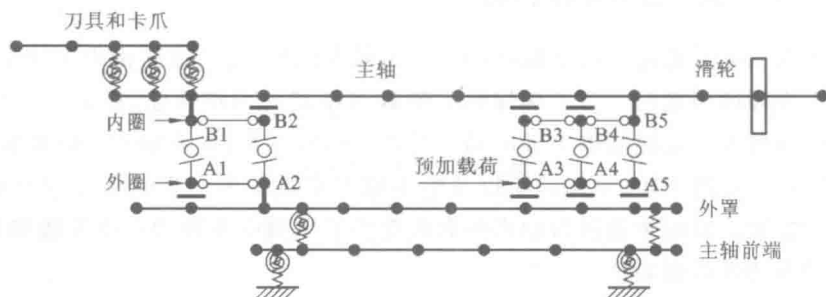
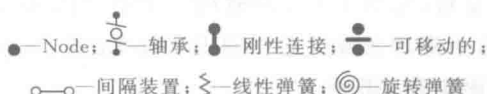


图 1-8 主轴-轴承系统的有限元模型



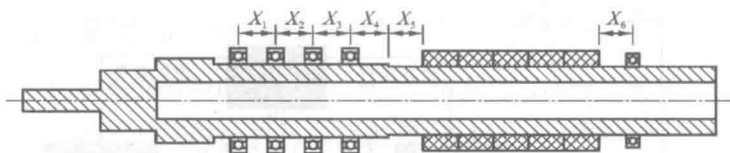


图 1-9 主轴-轴承系统的初步设计变量

Jiang Shuyun 和 Zheng Shufei 利用整体传递矩阵法,考虑非线性滚动轴承离心力和陀螺效应,建立主轴-拉杆-轴承装置的双转子模型(见图 1-10),系统计算主轴的临界转速和动态刚度,分析轴承轴向预紧、轴承类型、轴承跨距和电机转子内部参数对电主轴的动态特性的影响,且采用最佳选择的方法设计电主轴。结果发现,轴向载荷和电机转子内部参数对电主轴动态特性的影响远远大于轴承跨距和后轴承规格对电主轴动态特性的影响。Jiang shuyun 等基于传递矩阵法和 Jones-Harris 的滚动轴承的非线性模型发现,加工条件、轴肩、电机直径和轴承布置对电主轴动态特性有影响。

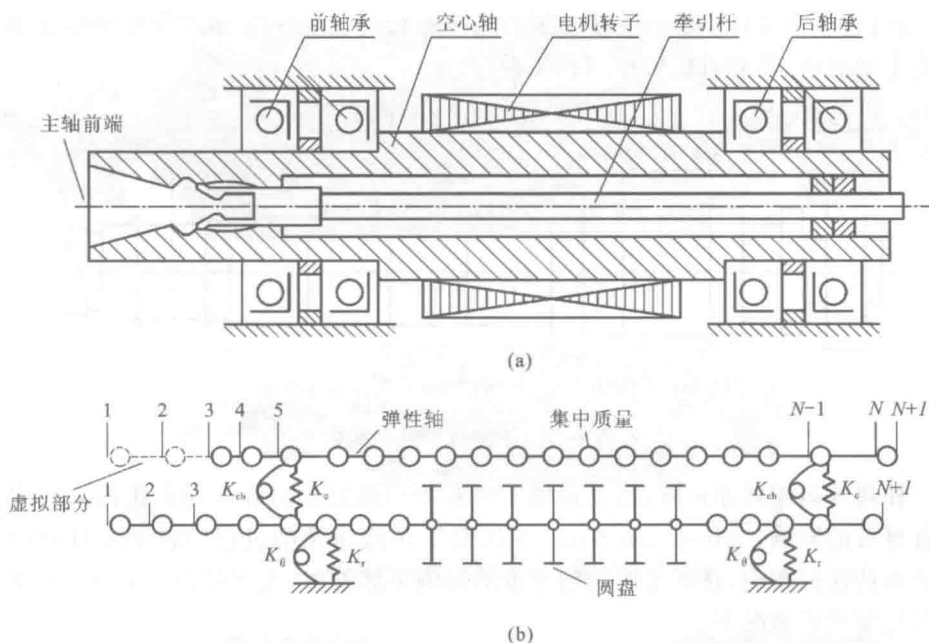


图 1-10 主轴-拉杆-轴承装置的双转子模型

由于电主轴将刀具和内置电机相结合,其动态特性相较于传统主轴的更加复杂,所以很有必要在考虑多重物理量耦合特性的条件下,彻底了解系统参数对电主轴动态特性的影响。Liu Junfeng 等提出了一个电主轴综合模型(见图 1-11)来研究电主轴的电-热-结构动态特性。

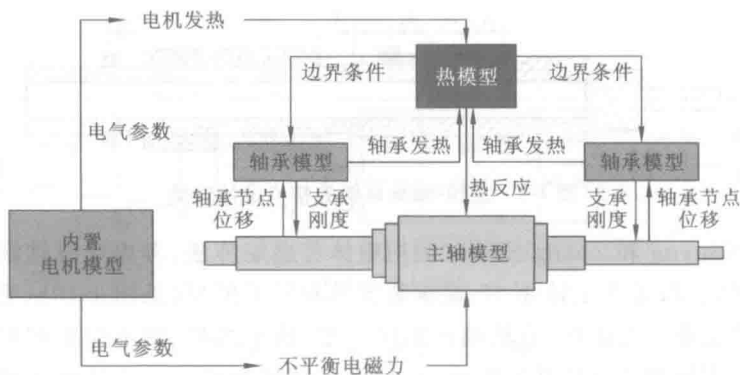


图 1-11 电主轴综合模型

该综合模型包括 4 个耦合的子模型：轴承模型、内置电机模型、热模型和主轴模型，在主轴模型中确定了 5 个设计参数（见图 1-12），并通过 170MD15Y20 型电主轴对该综合模型进行验证，分别在考虑多重物理量和不考虑多重物理量的情况下，通过这 5 个设计参数对电主轴固有频率进行灵敏度分析，从结果中能清晰地看出电主轴的电、热和机械特性耦合关系。

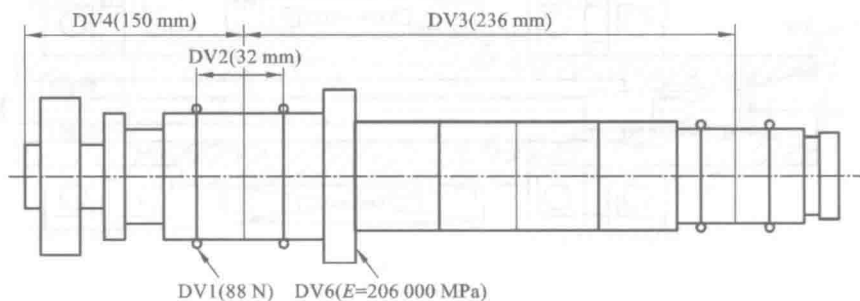


图 1-12 主轴模型设计参数

杜超等运用传递矩阵法，发现轴承跨距和前端悬伸量在一定范围内对临界转速有显著的影响。Masakazu Soshi 等研究了在低速铣削过程中铣削速度对电主轴动态特性的影响，在低速时铣削速度的影响不能忽视，尤其是在电主轴采用难切削材料制造的情况下。

对电主轴进行模态分析，了解电主轴的动态性能。何强等、徐一闯等、巫少龙等和文怀兴等基于 ANSYS Workbench 有限元分析软件对电主轴进行了模态分析，研究主轴的振型、固有频率和临界转速，分析了主轴各阶频率和振型特点。汪维康等通过电主轴的振动模态分析研究了主轴在刚性和弹性支承下的运行状态。



1.1.3 电主轴的热态特性仿真

由于电主轴的温升影响电主轴的性能、寿命及机床的加工精度,所以应考虑产热、瞬态热行为,轴承元件的热传递及接触热阻、组件与环境之间的热流量,吕晶等、籍永建等和涂明等建立热分析模型和热-结构耦合分析模型,得到主轴温度场和热变形分布。Ma Chi 等为了避免高速电主轴由于在设计阶段的温度场不均匀分布引起实际加工过程中加工精度降低,在考虑接触热阻(TCR)和轴承刚度对仿真结果准确性的综合影响的情况下,提出了一个电主轴三维(3D)有限元分析(FEA)模型(见图 1-13),并运用该模型分析了电主轴的瞬态热与结构相互作用,对在有限元模型中使用的边界条件的计算方法进行了详细讨论,如热载荷、对流传热、TCR 和轴承刚度,同时进行了热平衡试验,说明了模型的正确性。结果表明,有限元分析模型可以准确地模拟电主轴的温度场(见图 1-14)和热变形(见图 1-15),有限元分析模型比传统的忽略 TCR 和轴承刚度的高速电主轴热模型更准确。

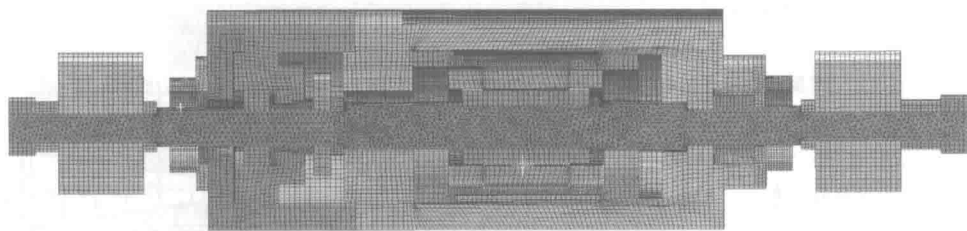


图 1-13 电主轴三维有限元分析模型

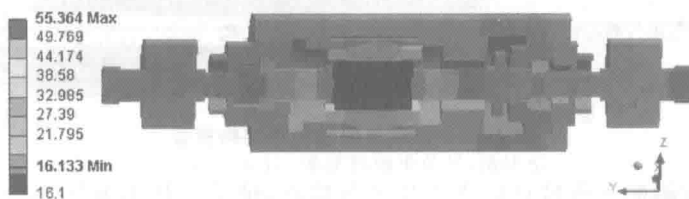
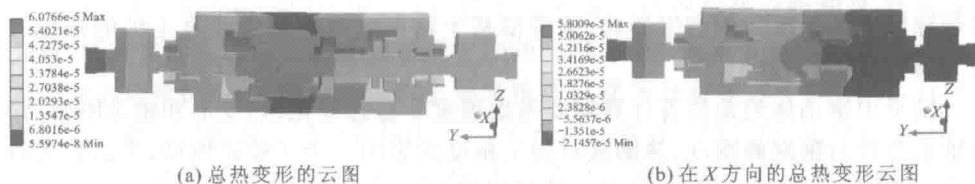


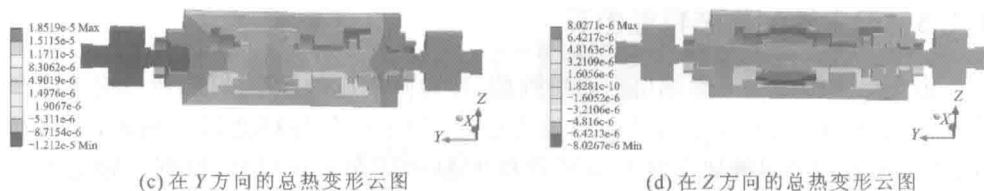
图 1-14 达到热平衡状态时的温度场分布云图



(a) 总热变形的云图

(b) 在 X 方向的总热变形云图

图 1-15 达到热平衡状态时的热变形云图



续图 1-15

在电主轴工作过程中,轴承和电机产生的热量扩散到周围空气、电机的冷却液和电主轴的结构中,电主轴零件产生热膨胀。基于此,T. Holkup 等提出了一个滚动轴承和电主轴的热结构模型(见图 1-16 和图 1-17),利用经过试验验证的热-结构模型预测特定工作条件下电主轴的温度分布和热增量以及轴承的刚度和接触载荷,同时在模拟过程中考虑温度、变形、润滑剂黏度和轴承刚度的瞬时变化,利用轴承特性来估计电主轴的动态特性变化。结果发现,温度的瞬态变化可能会引起轴承的刚度和接触力改变,从而导致电主轴的咬合和损坏。

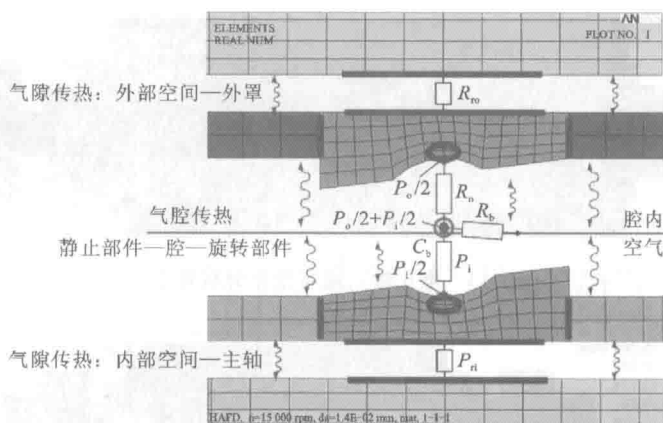


图 1-16 轴承与周围的热结构模型

高速电主轴的工作特性取决于其热态特性,轴承生热主要传递给主轴和周围空气,造成电主轴零件的热膨胀,Aleksandar Zivkovic 等对配有角接触球轴承的电主轴的热-结构模型(见图 1-18 和图 1-19)进行研究。该电主轴的主要热源是由角接触球轴承的摩擦力矩产生的热,该模型基于轴承的力学模型和电主轴的弹性有限元模型(见图 1-20)。

轴承中滚动体的角位置计算需要考虑温度非稳态变化、热变形和轴承刚度,预测轴承特性对轴端静刚度、热膨胀对加工精度的影响。为了验证模型,将试验测得的主轴在不同的转速下主轴温度和轴端刚度与仿真结果(见图 1-21 和图 1-22)进行对比。试验结果表明,轴承的温度随着主轴转速的增大而升高,导致轴承各零件

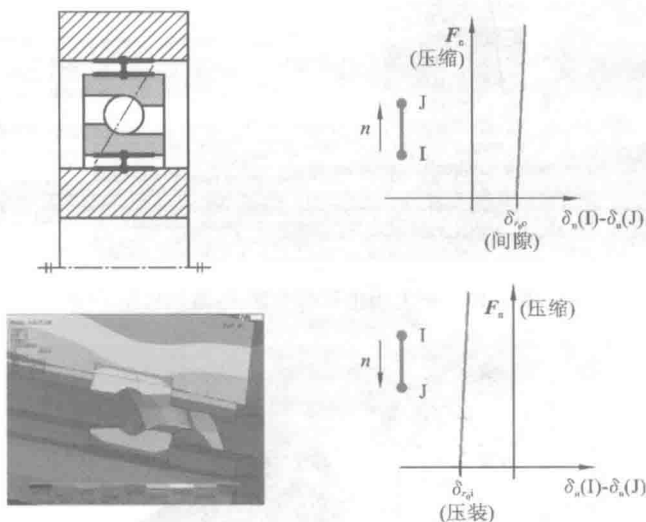


图 1-17 在预紧力、离心力、温度和径向安装条件(IR 压配合、间隙)影响下的径向位移有限元模型 CONTACT12 单元属性

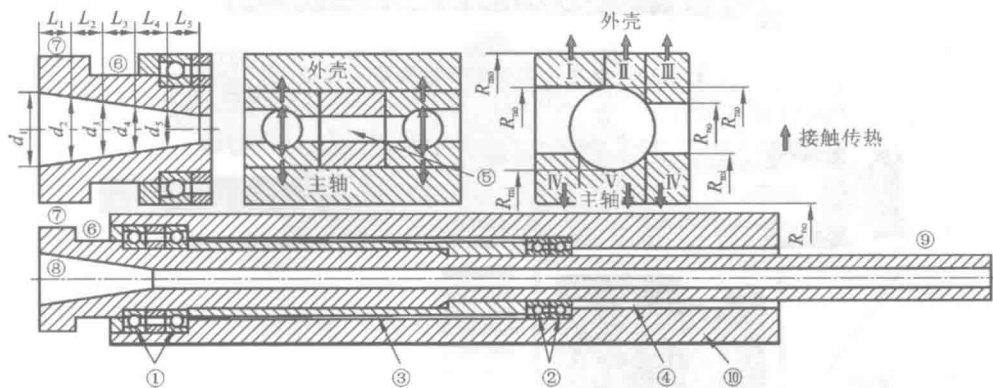


图 1-18 主轴、轴端和轴承的热-结构模型

①, ②—轴承发热; ③, ④, ⑤—环形间隙强制对流; ⑥, ⑦, ⑧, ⑨—强制对流; ⑩—外部自由对流

的膨胀, 从而造成轴承刚度增加, 使轴端刚度增加。

Zhao Changlong 和 Guan Xuesong 利用有限元法进行热分析和热-结构耦合分析, 所建立的主轴系统的有限元模型如图 1-23 所示, 模拟了电主轴在有无冷却系统时的热量扩散(无冷却系统时主轴系统的温度场分布如图 1-24 所示, 有冷却系统时主轴系统的温度场分布如图 1-25 所示), 并预测了热变形(无冷却系统时主轴系统的热变形如图 1-26 所示, 有冷却系统时主轴系统的热变形如图 1-27 所示)。这为主轴系统的设计提供了依据。