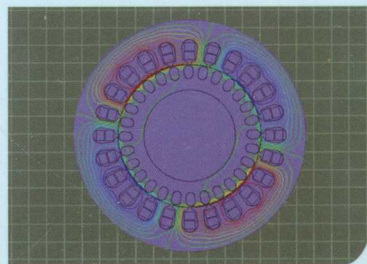
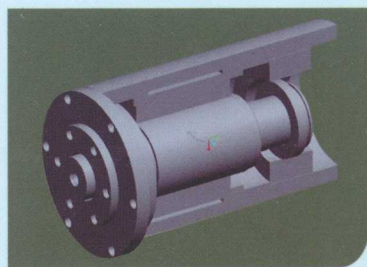


# 高速数控机床电主轴控制技术

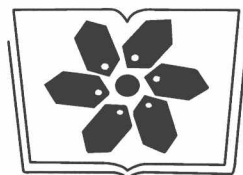
吴玉厚 张丽秀 著



科学出版社

013046163

TG659  
474



中国科学院科学出版基金资助出版

# 高速数控机床电主轴控制技术

吴玉厚 张丽秀 著



科学出版社

北京



北航

C1652881

TG659  
474

7-03-036641-2

## 内 容 简 介

本书较系统地介绍了高速数控机床电主轴的工作原理,以及电主轴的常用控制技术,即恒压频比控制技术、矢量控制技术及直接转矩控制技术。通过仿真技术及实验数据,详细分析了变频器控制下电主轴的电磁损耗及电磁振动问题。结合国家自然科学基金项目及国家 863 计划项目的理论研究成果及技术上的最新进展,对比分析了变频器控制下陶瓷电主轴与金属电主轴的电磁损耗及电磁振动的区别。将智能控制应用于电主轴的直接转矩控制,在分析定子电阻对控制系统性能影响的基础上,介绍了采用智能控制技术进行电主轴定子电阻辨识的新方法。

本书可供研究院(所)、高等院校、企业从事数控、自动化、电气传动技术及电主轴关键技术和开发的人员阅读,也可供高等院校相关专业的研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速数控机床电主轴控制技术/吴玉厚,张丽秀著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-036641-2

I. ①高… II. ①吴…②张… III. ①数控机床-主轴-控制 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 020958 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:19

字数:369 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

高性能主轴系统是高速数控机床的核心功能部件之一,是实现高速加工不可或缺的基本单元,它对机床的加工效率及零件的加工精度有着极其重要的影响。电主轴的运动控制对电主轴的损耗、振动有着至关重要的影响,运动控制技术是实现电主轴高性能驱动的核心技术。电主轴运动控制技术主要包含转速开环的恒压频比控制技术、转速闭环的恒压频比控制技术、矢量控制技术及直接转矩控制技术,分析各种控制技术的原理及其对电主轴性能的影响具有十分重要的意义。

本书是在国家自然科学基金项目(50975182)和国家863计划项目(2006AA03Z533)的理论研究成果及最新技术进展的基础上撰写而成的。本书在撰写过程中,将电主轴控制技术与电主轴性能相结合,系统地阐述国内外先进的电主轴控制技术及电主轴控制模式对电主轴性能的影响。本书共包含三个层面的内容。第一层面的内容为电主轴控制技术基础,主要介绍电主轴结构及工作原理、电主轴运行特性、电主轴控制系统的构成、脉宽调制逆变原理及常用的电主轴变频控制模式;第二层面的内容为智能方法在电主轴控制技术中的应用,首先介绍模糊控制及神经网络技术在电主轴控制中的应用,然后在分析定子电阻对电主轴控制性能影响的基础上,重点说明混合智能方法在电主轴定子电阻辨识中的应用;第三层面的内容为电主轴控制对电磁损耗及电磁振动的影响,这部分内容也是本书的核心内容之一,系统分析变频器控制下电主轴的电磁损耗及电磁振动特性,同时介绍电主轴运行特性的实验方法及一种可用于电主轴运行特性检测的实验系统。

本书力求体现内容的系统性、理论性、先进性和实用性。在撰写过程中参考了普通电动机设计中对电磁损耗及电磁振动的分析,并结合电主轴运行特性要求及控制特点,充分考虑了电主轴控制电源的高频及非正弦特性,讨论了电主轴控制与普通电动机控制的区别与联系。同时,在电主轴电参数的检测方面,作者也参考了普通三相电动机的电参数检测方法。

本书较突出的特点是在电主轴电磁损耗及电磁振动分析中,将陶瓷电主轴的仿真分析及试验检测结果与金属电主轴进行了详细的对比。

本书得到了大连理工大学、洛阳轴研科技股份有限公司、上海电工具研究所及东北大学部分教师及工程技术人员的帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者提出宝贵意见。

# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 电主轴工作原理                  | 1  |
| 1.1 电主轴概述                      | 1  |
| 1.1.1 电主轴分类                    | 1  |
| 1.1.2 电主轴结构                    | 3  |
| 1.1.3 电主轴电机工作原理                | 5  |
| 1.1.4 电主轴技术参数                  | 9  |
| 1.1.5 电主轴技术发展趋势                | 11 |
| 1.2 电主轴关键技术                    | 12 |
| 1.2.1 高速电主轴轴承技术                | 13 |
| 1.2.2 电主轴电动机及控制技术              | 18 |
| 1.2.3 电主轴润滑及冷却技术               | 22 |
| 1.2.4 电主轴动平衡技术                 | 26 |
| 1.2.5 电主轴刀具接口技术                | 27 |
| 1.3 电主轴运行性能                    | 30 |
| 1.3.1 精度和刚度                    | 30 |
| 1.3.2 临界转速                     | 31 |
| 1.3.3 残余动不平衡值及验收振动速度值          | 31 |
| 1.3.4 噪声与套筒温升值                 | 32 |
| 1.3.5 拉紧刀具的拉力值和松开刀具所需压力的最小和最大值 | 32 |
| 1.3.6 使用寿命值                    | 32 |
| 1.3.7 电主轴与刀具接口                 | 33 |
| 1.3.8 其他伺服性能                   | 33 |
| 第 2 章 电主轴控制系统概述                | 36 |
| 2.1 电主轴发展现状                    | 36 |
| 2.1.1 高速电主轴技术发展现状              | 36 |
| 2.1.2 电主轴单元运行特性研究现状            | 42 |
| 2.2 电主轴驱动系统构成                  | 50 |
| 2.2.1 变频器外接端口                  | 52 |
| 2.2.2 变频器功能参数                  | 54 |
| 2.3 变频器主要功能                    | 55 |

|            |                           |           |
|------------|---------------------------|-----------|
| 2.3.1      | 频率给定功能 .....              | 55        |
| 2.3.2      | 运行控制功能 .....              | 63        |
| 2.3.3      | 变频器控制方式及选择功能 .....        | 67        |
| 2.3.4      | 制动控制功能 .....              | 77        |
| <b>第3章</b> | <b>脉宽调制技术 .....</b>       | <b>83</b> |
| 3.1        | 脉宽调制逆变原理 .....            | 83        |
| 3.1.1      | 脉宽调制原理 .....              | 84        |
| 3.1.2      | 脉宽调制逆变电路 .....            | 86        |
| 3.2        | 三角载波脉宽调制 .....            | 87        |
| 3.2.1      | 脉宽调制 .....                | 87        |
| 3.2.2      | 脉宽调制方式 .....              | 89        |
| 3.3        | 电流跟踪脉宽调制 .....            | 91        |
| 3.4        | 磁通跟踪脉宽调制 .....            | 92        |
| 3.4.1      | 电压空间矢量 .....              | 92        |
| 3.4.2      | 电压空间矢量与磁通轨迹 .....         | 93        |
| 3.4.3      | 磁通跟踪脉宽调制 .....            | 96        |
| <b>第4章</b> | <b>电主轴控制技术 .....</b>      | <b>99</b> |
| 4.1        | 电主轴恒压频比控制技术 .....         | 99        |
| 4.1.1      | 电主轴控制方式与特性分析 .....        | 99        |
| 4.1.2      | 电主轴电压-频率控制机械特性 .....      | 100       |
| 4.1.3      | 电主轴恒压频比控制建模及仿真分析 .....    | 104       |
| 4.2        | 电主轴矢量控制技术 .....           | 107       |
| 4.2.1      | 坐标变换 .....                | 107       |
| 4.2.2      | 电主轴动态数学模型 .....           | 109       |
| 4.2.3      | 电主轴矢量控制 .....             | 112       |
| 4.2.4      | 无速度传感器矢量控制系统建模与仿真分析 ..... | 112       |
| 4.2.5      | 高速永磁电主轴矢量控制 .....         | 118       |
| 4.3        | 电主轴直接转矩控制技术 .....         | 119       |
| 4.3.1      | 电主轴直接转矩控制原理 .....         | 119       |
| 4.3.2      | 逆变器数学模型与空间电压矢量 .....      | 122       |
| 4.3.3      | 电主轴直接转矩控制系统模型 .....       | 125       |
| 4.3.4      | 电主轴直接转矩控制系统仿真及结果分析 .....  | 133       |
| 4.3.5      | 永磁同步电主轴直接转矩控制 .....       | 136       |
| 4.4        | 直接转矩控制与矢量控制的内在联系与区别 ..... | 136       |
| 4.4.1      | 直接转矩控制与矢量控制的内在联系 .....    | 137       |
| 4.4.2      | 直接转矩控制与矢量控制的区别 .....      | 138       |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 电主轴智能控制技术与应用</b> .....  | 141 |
| 5.1 概述 .....                     | 141 |
| 5.1.1 电主轴控制的难点问题 .....           | 141 |
| 5.1.2 基于智能控制的电主轴驱动技术 .....       | 143 |
| 5.2 模糊控制技术在电主轴控制中的应用 .....       | 144 |
| 5.2.1 基本模糊调节器 .....              | 145 |
| 5.2.2 模糊神经网络(FNN)调节器 .....       | 147 |
| 5.2.3 模糊神经网络控制器 .....            | 151 |
| 5.3 人工智能技术辨识电主轴参数 .....          | 155 |
| 5.3.1 定子电阻对直接转矩控制性能的影响 .....     | 155 |
| 5.3.2 定子电阻特性分析 .....             | 158 |
| 5.3.3 基于 RBF 神经网络定子电阻辨识 .....    | 164 |
| 5.3.4 定子电阻混合智能辨识方法 .....         | 170 |
| 5.3.5 定子电阻混合智能辨识仿真试验 .....       | 179 |
| 5.3.6 定子电阻辨识直接转矩控制系统仿真验证 .....   | 181 |
| <b>第 6 章 变频器控制下电主轴损耗特性</b> ..... | 182 |
| 6.1 电主轴损耗理论基础 .....              | 182 |
| 6.1.1 电主轴损耗分类 .....              | 182 |
| 6.1.2 电主轴基本铁耗 .....              | 183 |
| 6.1.3 空载时铁芯中的附加损耗 .....          | 188 |
| 6.1.4 电气损耗 .....                 | 190 |
| 6.1.5 负载时的附加损耗 .....             | 191 |
| 6.1.6 机械损耗 .....                 | 194 |
| 6.2 变频器控制下电主轴损耗特性有限元分析 .....     | 196 |
| 6.2.1 非正弦供电对电主轴损耗的影响 .....       | 196 |
| 6.2.2 非正弦供电对电主轴损耗影响有限元分析 .....   | 197 |
| 6.3 载荷对电主轴损耗影响分析 .....           | 201 |
| 6.3.1 载荷对电主轴损耗影响的仿真分析 .....      | 202 |
| 6.3.2 连接式电主轴自动加载试验装置及检测效果 .....  | 204 |
| 6.3.3 载荷对电主轴损耗影响试验研究 .....       | 211 |
| 6.4 电主轴温度特性 .....                | 214 |
| <b>第 7 章 变频器控制下电主轴振动特性</b> ..... | 216 |
| 7.1 概述 .....                     | 216 |
| 7.2 电主轴电磁振动机理 .....              | 217 |
| 7.2.1 电主轴空间谐波 .....              | 217 |
| 7.2.2 电主轴时间谐波 .....              | 220 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 7.2.3 电主轴三相合成磁势 .....            | 220        |
| 7.2.4 谐波对电磁力的影响 .....            | 222        |
| 7.3 电主轴电磁力分析及计算方法 .....          | 222        |
| 7.3.1 电磁场计算解析法 .....             | 222        |
| 7.3.2 电磁场计算有限元法 .....            | 226        |
| 7.4 变频器控制模式对电磁振动的影响 .....        | 228        |
| 7.4.1 变频器控制模式对电磁振动影响的仿真分析 .....  | 228        |
| 7.4.2 变频器控制模式对电磁振动影响的试验研究 .....  | 230        |
| 7.5 载荷对电磁振动的影响 .....             | 236        |
| 7.5.1 载荷对电磁振动影响的仿真分析 .....       | 237        |
| 7.5.2 载荷对电磁振动影响的试验研究 .....       | 242        |
| 7.6 转轴材料对电磁振动的影响 .....           | 247        |
| 7.6.1 转轴材料对电磁振动影响的仿真分析 .....     | 247        |
| 7.6.2 转轴材料对电磁振动影响的试验研究 .....     | 250        |
| <b>第8章 变频器控制下陶瓷电主轴运行特性</b> ..... | <b>252</b> |
| 8.1 陶瓷电主轴损耗特性 .....              | 252        |
| 8.1.1 陶瓷电主轴与金属电主轴损耗对比 .....      | 252        |
| 8.1.2 载荷对陶瓷电主轴损耗的影响 .....        | 259        |
| 8.1.3 变频器载波比对陶瓷电主轴损耗的影响 .....    | 260        |
| 8.2 陶瓷电主轴振动特性 .....              | 265        |
| 8.2.1 V/F 控制下陶瓷电主轴振动性能试验 .....   | 265        |
| 8.2.2 气隙对电磁振动影响的仿真分析 .....       | 268        |
| 8.3 陶瓷电主轴抵抗单边磁拉力的能力分析 .....      | 271        |
| 8.3.1 气隙偏心对陶瓷电主轴转子系统的影响 .....    | 272        |
| 8.3.2 偏心条件下定子电流变化对单边磁拉力的影响 ..... | 276        |
| 8.3.3 单边磁拉力作用下电主轴转轴位移有限元分析 ..... | 278        |
| <b>参考文献</b> .....                | <b>281</b> |

# 第 1 章  电主轴工作原理

高速加工技术可以解决机械产品制造中的诸多难题,如获得特殊的加工精度和表面质量,这项技术在各类装备制造业中得到越来越广泛的应用,从而使得高速数控机床成为装备制造业的战略产业。高性能主轴系统是高速数控机床的核心功能部件之一,对机床的加工效率及零件的加工精度有着极其重要的影响。本章主要介绍电主轴的分类、结构及工作原理,并在此基础上分析电主轴的关键技术及运行性能。

## 1.1  电主轴概述

随着变频调速技术(电动机矢量控制技术、直接转矩控制技术等)的迅速发展和日趋完善,高速数控机床主传动的机械结构已经得到极大的简化,取消了带轮传动和齿轮传动。机床主轴由内装式电动机直接驱动,从而把机床主传动链的长度缩短为零,实现了机床的“零传动”。这种主轴电动机与机床主轴“合二为一”的传动结构形式,使主轴部件从机床的传动系统和整体结构中相对独立出来,因此成为“主轴单元”,俗称“电主轴”<sup>[1]</sup>。电主轴在英文中有多种称谓,如 electric spindle、motor spindle、motorized spindle、high frequency spindle 以及 direct drive spindle 等。电主轴与传统的主轴传动系统相比,具有结构紧凑、简单的特点,便于在多轴联动机床上应用。

### 1.1.1  电主轴分类

高速电主轴单元是高速加工机床的核心部件。高速电主轴单元的类型通常按支承轴承型式、润滑方式、冷却方式、应用领域及电动机类型进行分类。具体分类见表 1.1。

表 1.1  电主轴分类

| 分类方法   | 种  类                 |
|--------|----------------------|
| 支承轴承型式 | 滚动轴承、磁悬浮轴承、流体动(静)压轴承 |
| 润滑方式   | 油脂、油雾、油气             |
| 冷却方式   | 水冷、风冷、自冷             |
| 应用领域   | 车削、铣削、磨削、钻削、旋辗、离心等   |
| 电动机类型  | 交流异步型电动机、永磁同步型电动机    |

### 1. 磨削用电主轴

磨削用电主轴是目前国内最主要的电主轴类型,也是国内外最早研发应用的类型,磨削用电主轴主要应用于高速磨削以提高磨削线速度和表面质量为目的,需要具有高速度、高精度和输出功率大的特点,如轴承磨床、各种内圆磨床、外圆磨床等。

### 2. 车削用电主轴

车削用电主轴可获得良好的加工精度和表面质量,特别适用于铝、铜等有色金属零件的加工。车削加工中心所使用的电主轴应该具备两方面的性能,一方面要能够传递运动及扭矩,并具有在带动工件旋转的同时直接承受切削力的能力;另一方面,电主轴要在一定载荷和转速下保证工件精确而稳定地绕其轴线作回转运动,并在动态和热态的条件下,仍能保持这一性能。因此,车削加工中心所使用的电主轴应具备如下特征:

(1) 高回转精度。车削加工中心电主轴作为装夹工件的基准,将运动传递给工件,因此其回转精度直接影响加工精度。为了使电主轴在高速运转时获得较高的回转精度,除了要保证其关键零件必须进行精加工和超精加工外,还要选用尺寸和精度等级合适的轴承,并采用合理的装配方案。

(2) 高刚度。主轴刚度反映主轴单元抵抗外载荷的能力。为了保证加工精度、避免振动,要求电主轴具备较高的径向刚度及轴向刚度。特别是在粗加工时,切削量较大,主轴要承受很大的径向力,因此对轴向刚度的要求更高。

(3) 抗振性强。振动是主轴动态性能的重要指标,振动将会产生噪声,并直接影响工件的表面加工质量,振动严重时会产生崩刃打刀现象。机床工作时,主轴部件不仅受静态力的作用,同时还受其他冲击力和交变干扰力的作用而产生振动。因此,电主轴的抗振性要强。

(4) 电动机特性优良。车削加工中心因为既要实现粗加工,又要实现精加工,因此要求有较广的加工范围,这就要求电主轴既要有优良的低速加工性能,又要有很好的高速加工性能。因此,加工中心电主轴需要在起步及低速段采用恒转矩调速,保证低速时有较大的输出转矩,满足低速大进给的切削要求;而高速段采用恒功率调速,可以满足小切削量的高转速要求。对一些低速性能要求高的电主轴,应采用高性能的矢量变频器控制。

(5) 热特性稳定。由于电主轴是将高速电动机置于机床主轴部件内部,高速运转时,电动机定子、转子和轴承的发热量很大,从而引起热变形,直接影响机床的工作性能和加工精度,因此要求加工中心电主轴的热态性能稳定。

### 3. 铣削用电主轴

铣削用电主轴与数控铣、雕铣机及加工中心相配套,进行高速铣削和雕刻加工,适用于常规零件、工模具、木工件加工。铣削用电主轴有自动换刀和手动换刀两种,自动换刀主轴带有自动松拉刀系统,刀具更换方便快捷;手动换刀主轴结构简单,经济实惠、适合不需频繁换刀的机床。雕铣用电主轴转速偏高,一般在24 000r/min以上,通常选用ER弹簧卡头来夹持刀具,其电动机输出可分为恒功率和恒转矩两种,市场占有率为70%~80%。大型数控铣削用电主轴由于不设刀库,无需换刀,因此可选用开环控制。加工中心用电主轴通常采用闭环编码控制,若需实现低速大扭矩输出,在选择电主轴型号时,需要提供电主轴转速范围及恒功率段起点转速并且要有准停功能。电主轴润滑系统通常选用高速油脂润滑或油气润滑以减少油雾对环境的污染。

### 4. 钻削用电主轴

钻削用电主轴主要是指PCB板高速孔化所使用的电主轴,常规速度等级分60 000r/min、80 000r/min、90 000r/min、105 000r/min、120 000r/min、180 000r/min六种。前三种为油脂润滑型滚动轴承支承的电主轴,其加工范围为孔径0.2~0.7mm;后三种为空气静压轴承支承的电主轴,可用来钻削孔径为0.1~0.15mm的小孔。

### 5. 其他电主轴

高速离心机用电主轴广泛用于分离、粉碎、雾化、试验等高速离心领域。高速旋碾用电主轴用于加工空调设备的内螺纹铜管。特殊用途的电主轴主要用于驱动、试验、切割等。

#### 1.1.2 电主轴结构

电主轴的剖面图如图1.1所示,图中表明,电主轴由定子、转子、前盖、后盖、转轴、前端轴承、后端轴承、轴承预紧、水套及壳体组成。电主轴的定子是由具备高磁导率的优质硅钢片迭压而成,迭压成型的定子内腔带有冲制嵌线槽。转子通常由转轴、转子铁芯及鼠笼组成。转子与定子之间存在一定间隙,称为气隙,它是磁场能量转换的通路,用于实现将定子的电磁力场能量转换成机械能。电主轴的转子用热套的方法安装在转轴上,处于前后轴承之间,由热套后产生的摩擦力来实现大转矩的传递。由于转子内孔与转轴配合面之间有很大的过盈量,因此,在装配时必须将转子加热到200℃左右,迅速进行热压装配。电动机的定子通过冷却套(一般为水冷)固装在电主轴的壳体中。这样,电动机的转子就是机床的主轴,

电主轴的套筒就是电动机座。对于加工中心用电主轴,在主轴的后部安装有齿盘,作为电感式编码器,以实现电主轴的全闭环控制。一般情况下,电主轴前端外伸部分,依靠内锥孔和端面固定砂轮接杆或可换的刀柄。

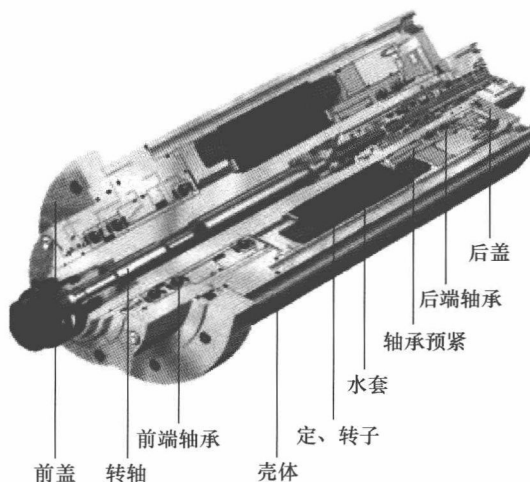


图 1.1 加工中心电主轴剖面①

电主轴是一种智能型功能部件,不但转速高、功率大,还具有控制主轴温升与振动等机床运行参数的功能,因此是承载高速切削技术的主体之一。在高速加工时,采用电主轴实现刀具/工件的精密运动并传递金属切削所需的能量是最佳的选择。其原因主要包括以下几点:

(1) 传统的主轴系统通过带轮或齿轮传动方式传递电动机的运动及转矩,由于齿轮及带轮不可避免地存在制造及安装误差,在高速运转条件下产生的振动和噪声等问题很难解决,影响高速加工的精度、加工表面粗糙度,并导致环境质量的恶化。电主轴系统采用内置电机与主轴合二为一的方式,实现了真正意义上的零传动,并在相对意义上解决了高速运行条件下机械零件导致的噪声及振动问题。

(2) 高速加工的最终目的是为了提高生产率,相应地要求在最短时间内实现高转速的速度变化,即要求主轴回转时具有极大的角加速度和减速度。达到这一要求的最有效的方法是将主轴传动系统的转动惯量尽可能地减至最小。而将电动机内置,省掉齿轮、带轮等一系列中间环节,可以达到这一目的。

(3) 对于电主轴来说,将电动机内置于主轴两支承之间,与传统的机械主轴结构相比,可以较大地提高主轴系统的刚度,从而提高系统的固有频率和临界转速值。这样,电主轴即使在最高转速运转时,仍然可以保证工作速度低于其临界转

① 来自 Edel Maschinenbau GmbH 公司。http://www.edelgmbh.de/englisch/index.htm。

速,从而避免了高速回转时的共振。

(4) 电主轴由于没有中间传动环节的外力作用,主轴高速运行时避免了中间传动冲击从而更为平稳,使得主轴轴承寿命相应地得到延长。

### 1.1.3 电主轴电机工作原理

#### 1. 三相异步电主轴工作原理

三相异步电主轴的定子通入三相对称电流,电主轴内部形成圆形旋转磁通、圆形旋转磁通密度,合成磁场随着电流的交变而在空间不断旋转,即产生基波旋转磁场,图 1.2 为不同时刻电主轴内部磁场仿真图。从图中可以看出,电主轴内部磁场为圆形,旋转磁通密度方向为逆时针旋转,若转子不转,转子鼠笼导条与旋转磁通密度相对运动,导条中产生感应电动势,其方向由右手定则确定。旋转磁场的转速为

$$n_s = 60 \frac{f_s}{n_p} \quad (1.1)$$

式中,  $n_p$  为电动机的极对数;  $f_s$  为电源频率, Hz;  $n_s$  为旋转磁场的转速(也称同步转速), r/min。

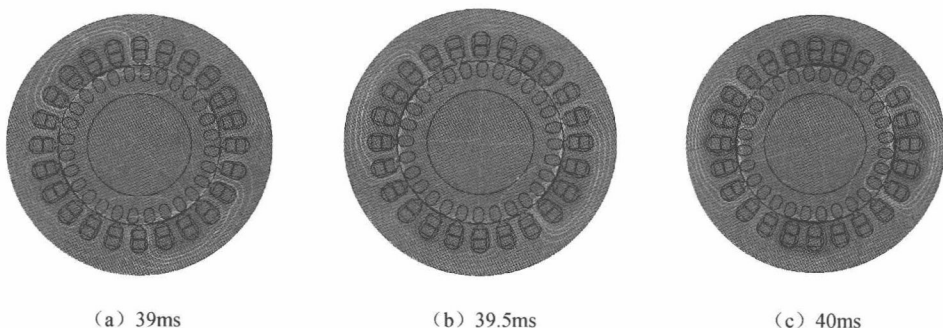


图 1.2 旋转磁场仿真图

转子导条彼此在端部短路,导条中产生电流  $i$ ,不考虑电动势与电流的相位差,该电流方向与电动势一致,导条在旋转磁场中所受电磁力为  $F$ ,产生电磁转矩  $T$ ,转子回路切割磁力线,其转动方向与旋转磁通势一致,并使转子沿该方向旋转。假设转子转速为  $n_r$ ,当  $n_r < n_s$  时,表明转子导条与磁场存在相对运动,产生的电动势、电流及受力方向与转子不转时相同,电磁转矩  $T$  为逆时针方向,转子继续旋转,并稳定运行。当转子的转速等于同步转速  $n_s$  时,转子与旋转磁场之间无相对运动,转子导条不切割旋转磁场,转子无感应电动势,无转子电流和电磁转矩,转子将无法继续转动。因此,异步电主轴的转子转速往往小于电源的同步转速<sup>[2]</sup>。

转子转速  $n_r$  与同步转速  $n_s$  之间的差异定义为转差率  $s$ , 即

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1.2)$$

式中,  $n_r$  为转子转速, r/min;  $n_s$  为同步转速, r/min。

由式(1.2)可知, 转差率越小, 表明转子转速越接近同步转速, 电主轴效率越高。

### 1) 定子电压方程

由前述可知, 三相异步感应电主轴中的旋转磁场是由定子电流和转子电流共同产生的。图 1.3 为三相异步电主轴定子、转子电路。其中图 1.3(a) 为定子电路, 图 1.3(b) 为转子电路,  $\dot{U}_s$ 、 $\dot{E}_s$ 、 $\dot{i}_s$  分别是定子的相电压、相电动势和相电流,  $\dot{U}_r$ 、 $\dot{E}_r$ 、 $\dot{i}_r$  分别是转子绕组的相电压、相电动势和相电流, 图中箭头的指向为各量的正方向。

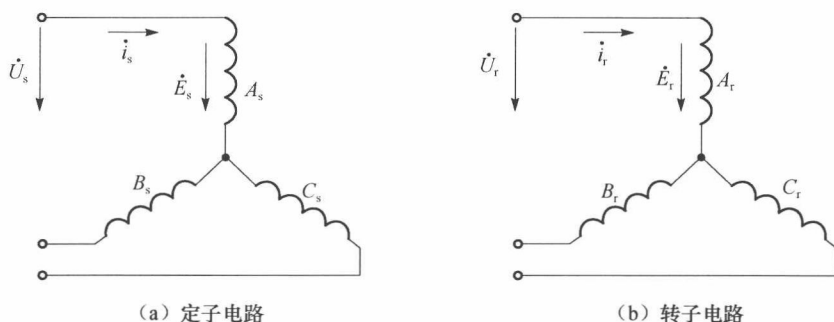


图 1.3 三相异步电主轴定子、转子电路

图 1.3 表明, 以同步转速旋转的气隙旋转磁场, 将在定子三相绕组内感应对称的三相电动势  $\dot{E}_s$ 。根据基尔霍夫定律, 定子每相所加的电源电压  $\dot{U}_s$ , 应当等于该电动势的负值  $-\dot{E}_s$  加上定子电流所产生的漏阻抗压降  $\dot{i}_s(R_s + jX_{s\sigma})$ 。于是, 定子的电压方程为

$$\dot{U}_s = \dot{i}_s(R_s + jX_{s\sigma}) - \dot{E}_s \quad (1.3)$$

式中,  $R_s$  为定子每相的电阻,  $\Omega$ ;  $X_{s\sigma}$  为定子每相的漏抗,  $\Omega$ ;  $\dot{E}_s$  为励磁电流  $\dot{i}_m$  在励磁阻抗上  $Z_m$  的压降, 即  $\dot{E}_s = -\dot{i}_m Z_m$ , V。

### 2) 转子电压方程

对于三相异步电主轴, 气隙主磁场除在定子绕组内感生频率为  $f_s$  的电动势  $\dot{E}_s$  外, 还将在旋转的转子绕组内感生转差频率  $f_r = sf_s$  的电动势  $\dot{E}_{rs}$ ,  $\dot{E}_{rs}$  的有效

值为

$$E_{rs} = 4.44sf_s N_r k_{wr} \Phi_m \quad (1.4)$$

式中,  $E_{rs}$  为气隙磁通在转子每相感应电动势的有效值, V;  $N_r k_{wr}$  为转子每相绕组的有效匝数;  $\Phi_m$  为每极气隙磁通量, Wb。

当转子不转( $s=1$ )时, 转子每相感应电动势为  $E_r$ , 即

$$E_r = 4.44f_s N_r k_{wr} \Phi_m \quad (1.5)$$

$$E_{rs} = sE_r \quad (1.6)$$

即转子的感应电动势与转差率  $s$  成正比,  $s$  越大, 主磁场“切割”转子绕组的相对速度就越大,  $E_{rs}$  也越大。

转子每相绕组也有电阻和漏抗。由于转子频率为  $f_r = sf_s$ , 故转子绕组的漏抗应为

$$X_{r\sigma} = 2\pi f_r L_{r\sigma} = 2\pi sf_s L_{r\sigma} = sX_{r\sigma} \quad (1.7)$$

式中,  $X_{r\sigma}$  为转子频率等于  $f_1$  (即转子不转) 时的漏抗,  $\Omega$ 。

感应电动机的转子绕组通常为短接, 即端电压  $U_r = 0$ , 此时根据基尔霍夫第二定律, 可写出转子绕组一相的电压方程为

$$\dot{E}_{rs} e^{j\omega_r t} = \dot{i}_{rs} e^{j\omega_r t} (R_r + jsX_{r\sigma}) \quad (1.8)$$

或

$$\dot{E}_{rs} = \dot{i}_{rs} (R_r + jsX_{r\sigma}) \quad (1.9)$$

式中,  $\dot{i}_{rs}$  为转子电流, A;  $R_r$  为转子每相电阻,  $\Omega$ 。

图 1.4 为定子、转子的耦合电路图, 其中定子频率为  $f_s$ , 转子频率为  $f_r$ , 定子电路和旋转的转子电路通过气隙旋转磁场(主磁场)相耦合。由于定子、转子频率不同, 相数和有效匝数也不同, 故定子、转子电路无法连在一起。为得到定子、转子统一的等效电路, 必须把转子频率  $f_r$  变换为定子频率  $f_s$ , 转子的相数  $m_r$ 、有效匝数  $N_r$  变换为定子的相数  $m_s$  和有效匝数  $N_s$ , 即进行频率归算和绕组归算。图 1.5 为频率和绕组归算后感应电动机的定子、转子电路图。

经过归算, 感应电主轴的电压方程和磁动势方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{i}_s (R_s + jX_{s\sigma}) - \dot{E}_s \\ \dot{E}'_r = \dot{i}'_r \left( \frac{R'_r}{s} + jX'_{r\sigma} \right) \\ \dot{E}_s = \dot{E}'_r = -\dot{i}_m Z_m \\ \dot{i}_s + \dot{i}'_r = \dot{i}_m \end{cases} \quad (1.10)$$

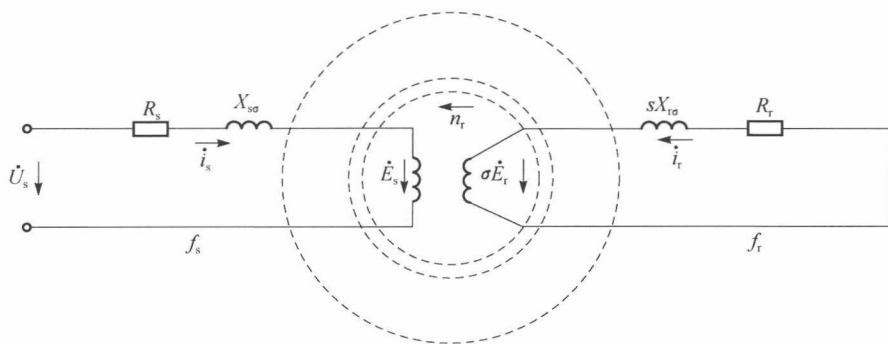


图 1.4 感应电动机定子、转子耦合电路示意图

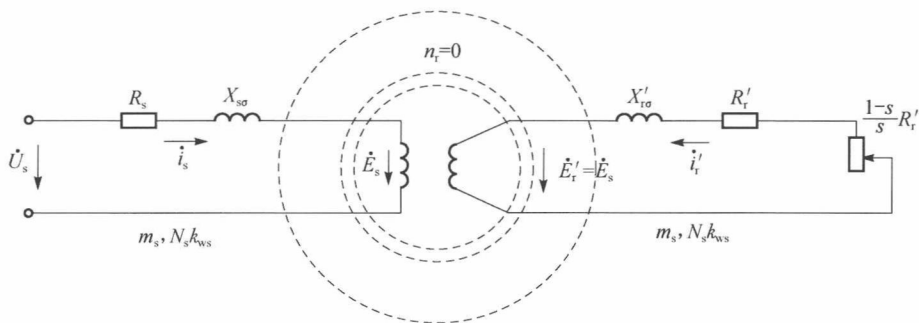


图 1.5 频率和绕组归算后感应电动机的定子、转子电路图

根据式(1.10)可得感应电主轴的 T 形等效电路,如图 1.6 所示。从图中可见,感应电主轴空载时,转子转速接近于同步转速,  $s \approx 0$ ,  $\frac{R'_r}{s} \rightarrow \infty$ , 转子相当于开路;此时转子电流接近零,定子电流近似于激磁电流。当电主轴加上负载时,转差率增大,  $\frac{R'_r}{s}$  减小,使转子、定子电流增大。负载时,定子电流和漏阻抗压降增加,导致  $E_s$

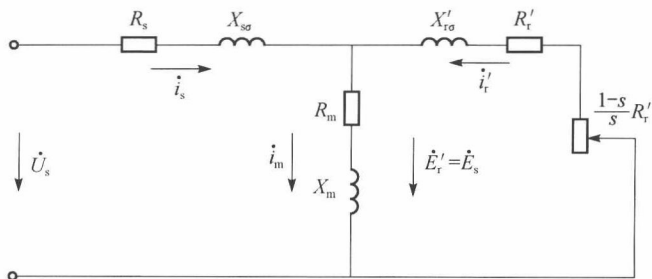


图 1.6 感应电动机的 T 形等效电路

和相应的主磁通值比空载时略小。启动时,  $s=1$ ,  $\frac{R'_r}{s}=R'_r$ , 转子和定子电流都很大; 由于定子的漏阻抗压降较大, 此时  $E_s$  和主磁通值将显著减小。

## 2. 永磁同步电主轴工作原理

永磁同步电主轴的定子与三相异步电主轴基本相同, 为三相对称结构; 转子为磁极, 按照转子结构形式分为凸极式和隐极式。凸极式适合用于低速运行, 隐极式适合高速运行。因此对于电主轴来说, 以隐极式为主, 且励磁方式为永磁。

三相同步电主轴定子绕组通以三相对称电流时, 在定子绕组产生基波旋转磁场, 其旋转同步转速与式(1.1)相同。转子采用永磁体, 具有无励磁损耗、效率高等特点。在定子磁场和转子永磁体的相互作用下, 转子被定子基波旋转磁场牵引着以同步转速一起旋转, 转子转速  $n_r=n_s$ , 即转子以同步转速旋转。因为本书主要讲述异步电主轴的控制技术, 有关永磁同步电主轴详细工作原理可参阅其他书籍, 此处直接给出永磁电主轴定子电压方程

$$U_s = R_s i_s + \frac{d}{dt}(L_s i_s) + \frac{d}{dt}(\psi_m e^{j\theta_r}) \quad (1.11)$$

式中,  $U_s$  为定子电压空间矢量, V;  $R_s$  为定子电阻,  $\Omega$ ;  $L_s$  为等效同步电感, H;  $\psi_m$  为励磁空间矢量, Wb;  $\theta_r$  为电角度。

### 1.1.4 电主轴技术参数

不同电主轴的技术参数各有不同。磨削用电主轴的技术参数主要包括安装外径、最高转速、最高转速输出功率及润滑方式。加工中心用电主轴技术参数包括安装外径、最高转速、计算转速、恒功率转速范围、额定功率、计算转速转矩以及  $D_m n$  值等。各参数定义如下:

(1) 安装外径是指电主轴最外缘套筒的直径, 即电主轴外壳直径。

(2) 计算转速又称额定转速、基速。从电动机设计角度来说, 是指电动机在连续工况下工作时, 恒转矩与恒功率的转折点, 如图 1.7 和图 1.8 所示。它相当于图 1.8 中的 A 点的转速, 即小于计算转速时电主轴为恒转矩驱动, 其值大于计算转速时为恒功率驱动, 该点可以使电动机的转矩和功率均达到最大值, 同时工作效率达到最佳点。从使用角度来说, 该点最好是在电主轴常用的工作转速附近。

(3) 计算转速转矩指转速小于或等于计算转速时的转矩。

(4) 最高转速是指电主轴能够达到的最高工作转速, 是电主轴保持正常工作的极限转速值。电主轴能够达到的最高工作转速时的带载能力和效率都较低, 一般不希望在此点附近长时间工作。