

国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助
机械工业出版社高水平著作出版基金资助

新型电驱动控制系统 及其相关技术

程树康 蔡鹤皋 等著



机械工业出版社

本书是作者围绕新结构、新原理及新材料电机多年科研工作总结的一本专门著作。书中集中介绍了作者承担和参加国家自然科学基金项目、“~~重点~~”项目以及国际国内合作项目的部分研究成果。内容包括：① 正交圆柱（非球形）结构三自由度电动机和二自由度电动机结构、机理、解析分析、驱动控制系统构成、数学模型、电磁兼容性分析、多自由度电动机运动学分析、轨迹规划算法及仿真、软性故障诊断及在正交圆柱三自由度电动机系统中的应用；② 径向混合磁路多边耦合电机和轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的构成、工作原理、磁场解析、三维磁场模型、轴向磁场分布的分析研究、谐波反电动势的解析分析及轴向线圈的位置传感器机理；③ 多重气隙永磁一体化电机原理结构及数学模型、结构设计、电磁转矩分析、定位力矩分析计算及抑制对策、性能计算及结构参数分析、控制策略以及串联磁路结构多重气隙混合式电动机的转矩特性、定位转矩分析、数学模型及其相关参数分析；④ 错片结构直线步进电动机、混合磁路多边耦合直线推进器和 ~~勺~~型共永磁体平面两维直线电动机的结构及工作原理、解析分析、磁系统分析、齿层比磁导函数化方法以及微直线驱动系统的数学模型及控制策略等。

本书适于电机与电器、电力电子与电力传动、理论电工与新技术、机器人、自动控制、数控技术等领域的教师、研究生、本科高年级学生和研究人员及工程技术人员阅读参考。

图书在版编目（~~悦穿~~）数据

新型电驱动控制系统及其相关技术 ~~程~~树康等著 ~~京~~北京：机械工业出版社，~~国用编近~~

~~陈~~陈树康 ~~刘~~刘树康 ~~刘~~刘树康

I ~~国新~~... II ~~国程~~... III ~~国圆~~柱型直线电动机 IV ~~国精~~电机学—~~国原~~

中国版本图书馆 ~~悦穿~~数据核字（~~国用编~~）第 ~~国编~~ 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 ~~国号~~ 号 邮政编码 ~~国用编~~）

策划编辑：周娟 责任编辑：于苏华 版式设计：霍永明

责任校对：陈延翔 封面设计：王伟光 责任印制：

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

~~国用编~~年 ~~国用编~~月第 ~~国用编~~版第 ~~国用编~~次印刷

~~国用编~~定皂伊克~~国用编~~皂~~国用编~~：~~国用编~~张·~~国用编~~千字

定价： 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（~~国用编~~）~~国用编~~

封面防伪标均为盗版

前 言

电驱动控制系统是指以电能为能源，通过电动机本体、驱动器、传感器与控制器等进行能量变换的驱动电动机及控制电动机系统。它与燃油（气）动力系统、液压动力系统以及气压动力系统等组成动力群。电驱动控制系统以其自身的众多特点在各类产业机械、交通运输工具、航空、航天及兵器等领域占有重要地位。

随着科学技术的发展，电驱动控制系统与传统的电力拖动系统在理念上已出现微妙差异，传统的将电机理论、电力电子理论及控制理论等积木式地组合在一起的研究方法和生产方式已不适应系统性能提高及应用范围拓宽的需要。电驱动控制系统是多学科知识有机地融合交叉，因而探求并不断深化电驱动控制系统的基础理论以及探求和完善相应的开发生产模式是十分必要和有益的。电驱动控制系统中电机本体的多样化趋势已日趋明显。直流电动机、感应电动机、永磁同步结构无刷电动机、开关磁阻电动机和混合式开关磁阻电动机等的综合性能在“伯仲”之间，这为我们提供了一个良好的技术氛围。除对传统电机高性能、高精度的研究开发外，对有巨大潜力和潜在市场的新型电驱动控制系统的研究开发、设计工艺的支持和完善是一项重要的课题。电驱动控制系统得到越来越广泛的应用，同时对电驱动控制系统也提出越来越高的期望和要求。新结构、新原理、新材料电机，高比功率、高性能体积比电机以及多功能电机等成为国内外研究的热点。

作者围绕承担和参加完成的国家自然科学基金项目、~~重点~~项目、国家九五重大科技产业工程项目、黑龙江省重点项目以及国内外合作项目开展了研究工作。具体的项目支撑有：“混合磁路多边耦合电机基础理论及工程应用技术研究”（项目编号 ~~缘园园园园园~~），“实用性三自由度伺服电动机”（项目编号 ~~缘园园缘园园园园~~），“具有力觉功能的机器人微驱动末端操作器及其控制系统”（项目编号 ~~缘园园缘园园园园园园~~），“直接驱动电机及其控制系统”（项目编号 ~~缘园园缘园园园园园园~~），“解放牌混合动力城市客车电机及其控制系统”（项目编号 ~~缘园园缘园园园园园园~~），“红旗牌混合动力轿车电机及其控制系统”（项目编号 ~~缘园园缘园园园园园园~~），“电动汽车（概念车）电气系统总体研究及其车辆管理单元（~~灾~~）研制”（项目编号 ~~怨园园缘园园园园园园~~），“具有多种感知功能多手指仿人

目 录

前 言	
第 1 篇 多自由度电动机系统	1
第 1 章 正交圆柱结构多自由度电动机及其线性解析	1
1.1 正交圆柱结构三自由度电动机系统构成及工作原理	1
1.2 正交圆柱结构三自由度电动机的解析分析	1
1.3 正交圆柱结构三自由度电动机的力能指标	1
1.4 正交圆柱结构两自由度电动机的结构和运行原理	1
1.5 正交圆柱结构两自由度电动机的参数	1
第 2 章 正交圆柱结构三自由度电动机的驱动控制系统	1
2.1 正交圆柱结构三自由度电动机驱动控制系统的构成	1
2.2 相位时序控制电路的设计及原理	1
2.3 相电流控制电路的设计及原理	1
2.4 前级驱动电路设计及原理	1
2.5 主电路的设计及原理	1
2.6 保护电路的设计及原理	1
第 3 章 正交圆柱结构三自由度电动机系统数学模型及相关技术	1
3.1 正交圆柱结构三自由度电动机系统的数学模型	1
3.2 正交圆柱结构三自由度电动机绕组电流分析	1
3.3 正交圆柱结构三自由度电动机系统的电磁兼容性分析	1
第 4 章 软性故障诊断及在正交圆柱结构三自由度电动机系统中的应用	1
4.1 概述	1
4.2 电机系统软性故障的界定	1
4.3 电机系统软性故障诊断法的探讨	1
4.4 步进电动机系统典型软性故障的描述	1
4.5 低频振荡软性故障的分析	1
4.6 电机系统软性故障诊断法中自恢复控制策略的探索	1
第 5 章 正交圆柱结构二自由度电动机磁场及定位转矩计算	1
5.1 概述	1
5.2 正交圆柱结构二自由度电动机等效磁路模型	1
5.3 正交圆柱结构二自由度电动机磁路模型的变换	1
5.4 正交圆柱结构二自由度电动机磁导的计算	1
5.5 正交圆柱结构二自由度电动机气隙磁场的计算	1
5.6 正交圆柱结构二自由度电动机转子定位转矩特性计算	1
第 6 章 多自由度电动机运动学分析	1
6.1 概述	1

远圆	多自由度电动机位姿的描述	远圆
远猿	运动学方程的建立方法	远猿
远源	多自由度电动机运动学方程	远源
远缘	多自由度电动机运动学逆问题	远缘
远远	多自由度电动机的雅可比矩阵的定义及求解方法	远远
远苑	多自由度电动机的雅可比矩阵	远苑
远愿	多自由度电动机的雅可比矩阵的伪逆	远愿
第 苑章	多自由度电动机轨迹规划算法及仿真	远愿
苑员	概述	苑员
苑圆	多自由度电动机运动特点分析	苑圆
苑猿	连续轨迹运动的描述形式及变换	苑圆
苑源	等时间间隔的轨迹规划算法	苑圆
苑缘	等运动弧长的轨迹规划算法	苑源
苑远	轨迹规划仿真实例	苑缘
第 愿篇	混合磁路多边耦合电机系统	愿怨
第 愿章	混合磁路多边耦合电机	愿怨
愿员	永磁感应子式步进电动机的磁场解析	愿怨
愿圆	混合磁路多边耦合电机的结构	愿圆
愿猿	混合磁路多边耦合电机的磁场解析	愿猿
愿源	混合磁路多边耦合电机的静转矩解析	愿源
第 愿章	混合磁路多边耦合电机轴向磁场分布的实用性简化模型	愿苑
愿圆	混合磁路多边耦合电机轴向磁场分布的二维场实用性简化模型	愿苑
愿圆	模型的轴向磁场分布计算及实验研究	愿员
第 猿章	混合磁路多边耦合电机轴向磁场分布的分析研究	愿源
猿员	混合磁路多边耦合电机永磁体的配置	愿源
猿圆	混合磁路多边耦合电机轴向励磁线圈的轴向长度	愿缘
猿猿	混合磁路多边耦合电机铁心叠长	愿员
第 源章	混合磁路多边耦合电机的模型及特性计算	愿猿
源员	概述	愿猿
源圆	混合磁路多边耦合电机的结构模型	愿猿
源猿	混合磁路多边耦合电机的三维磁场模型	愿源
源源	混合磁路多边耦合电机的特性计算	愿圆
第 缘章	轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机及其电磁转矩的解析分析	愿源
缘员	概述	愿源
缘圆	轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机的构成和工作原理	愿源
缘猿	轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机转矩特性的解析分析	愿远
第 远章	混合磁路多边耦合电动机磁系统的分析研究	愿圆
远员	混合磁路多边耦合电动机齿层磁参数的计算与非线性磁网络模型的建立	愿圆
远圆	混合磁路多边耦合电动机特性及参数的计算	愿苑
第 苑章	轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电机轴向线圈的位置传感器机理	愿圆
苑员	概述	愿圆

圆圆 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电动机谐波反电动势的解析分析	圆圆
圆猿 轴径向气隙结构混合磁路多边耦合电动机谐波反电动势的仿真	圆猿
第 猿篇 多重气隙电机系统	圆源
第 员章 多重气隙永磁一体化电机原理结构及数学模型	圆源
圆员 概述	圆源
圆圆 多重气隙永磁一体化起动 原发电机的原理	圆源
圆猿 多重气隙永磁一体化起动 原发电机的等效磁路	圆源
圆源 多重气隙永磁一体化起动 原发电机的结构设计	圆圆
圆缘 多重气隙永磁一体化起动 原发电机的控制系统	圆缘
第 圆章 多重气隙永磁一体化电机电磁转矩分析	圆源
圆员 概述	圆源
圆圆 多重气隙永磁同步电动机的电磁转矩分析	圆源
圆猿 多重气隙永磁无刷直流电动机的电磁转矩分析	圆猿
圆源 多重气隙永磁电机电磁转矩实验研究	圆源
第 猿章 多重气隙永磁一体化电机定位力矩分析计算及抑制对策	圆源
猿员 概述	圆源
猿圆 多重气隙永磁电机定位力矩的产生机理	圆圆
猿猿 多重气隙永磁电机定位力矩的解析分析	圆圆
猿源 影响多重气隙永磁电机定位力矩波形的因素	圆圆
猿缘 多重气隙电机定位力矩的实验研究	圆员
第 源章 多重气隙永磁一体化电机性能计算及结构参数分析	圆缘
源员 概述	圆缘
源圆 多重气隙永磁发电机性能分析	圆缘
源猿 多重气隙永磁电机矩角特性	圆苑
第 缘章 多重气隙永磁电机控制策略	圆源
缘员 多重气隙永磁电机控制系统分析	圆源
缘圆 多重气隙永磁电机控制系统设计	圆缘
缘猿 电流调节器和速度调节器的数字实现	圆员
第 远章 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的转矩特性	圆缘
远员 概述	圆缘
远圆 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的结构	圆缘
远猿 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的转矩解析	圆源
远源 串联磁路结构多重气隙混合式电动机转矩特性的实验研究	圆愿
第 苑章 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的定位转矩分析及抑制策略	圆圆
苑员 概述	圆圆
苑圆 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的定位转矩分析	圆圆
苑猿 串联磁路结构多重气隙混合式电动机内、外定子错齿对电磁转矩的影响	圆源
苑源 串联磁路结构多重气隙混合式电动机定位转矩的实验研究	圆愿
第 愿章 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的数学模型及其相关参数分析	圆圆
愿员 概述	圆圆
愿圆 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的数学模型	圆圆

8.1.1	串联磁路结构多重气隙混合式电动机反电动势的分析与计算	810
8.1.2	串联磁路结构多重气隙混合式电动机电感的分析与测量	810
第 9 篇	特种结构直线电驱动系统	815
第 9 章	错片结构直线步进电动机	815
9.1	错片结构直线步进电动机的结构及工作原理	815
9.2	错片结构直线步进电动机的线性解析分析	816
9.3	错片结构直线步进电动机的优化	816
9.4	错片结构直线步进电动机轴向磁场分布	816
第 10 章	匀月型共永磁体二自由度平面直线电动机	816
10.1	概述	816
10.2	匀月型共永磁体二自由度平面直线电动机结构与原理	816
10.3	匀月型共永磁体二自由度平面直线电动机基本解析分析	816
10.4	二自由度平面直线电动机磁干涉的研究	816
第 11 章	混合式直线步进电动机的磁系统分析	816
11.1	概述	816
11.2	混合式直线步进电动机齿层比磁导法的深化研究	816
11.3	齿层比磁导法和气隙比磁导法的分析对比	816
第 12 章	混合磁路多边耦合直线推进器	816
12.1	概述	816
12.2	混合磁路多边耦合直线推进器的结构和工作原理	816
12.3	混合磁路多边耦合直线推进器的数学模型	816
12.4	混合磁路多边耦合直线推进器的实验研究	816
第 13 章	微型直线驱动器用驱动系统的设计与分析	816
13.1	无刷直流电动机驱动系统的总体结构	816
13.2	电动机驱动主电路的设计及原理	816
13.3	保护电路的设计及原理	816
13.4	逻辑电路的设计及原理	816
13.5	换相信号处理电路的设计及原理	816
13.6	电机系统的特性	816
第 14 章	微型直线驱动系统的数学模型及控制策略	816
14.1	机器人手指关节的组成及工作原理	816
14.2	机器人手指关节用直线驱动器的特点	816
14.3	微型直线驱动器的数学模型	816
14.4	微型直线驱动器的参数辨识	816
14.5	微型直线驱动器的滑模变结构控制策略	816
第 15 章	微型直线驱动器用无刷直流电动机的设计与分析	816
15.1	直线驱动器用无刷直流电动机的设计特点	816
15.2	直线驱动器用无刷直流电动机的磁场分析	816
15.3	直线驱动器用无刷直流电动机转子位置传感器	816
参考文献		816

员 正交圆柱结构三自由度电动机及原理

在 载向三自由度电动机原理结构示意图如图 员 所示。电动机由 载向定子部件 员 再向定子部件 圆 可动部件 猿和 在向转子部件 源组成。可动子 猿在 载 再 在三个方向上加工为正交的圆柱形，分别与部件 员 圆和 源的相应圆柱表面构成同心圆柱。气隙 员 苑和 愿分别介于部件 猿和 员 部件 猿和 圆及部件 猿和 源之间。载向和 再向定子部件由叠片硅钢片构成，铁心上沿 载轴和 再轴的圆柱和圆周按一定规律开有齿槽。槽内分别设置 载向和 再向的多相励磁绕组。在向转子使用叠片硅钢片，组成两段 在向转子铁心，铁心外圆上开有若干小齿。两段铁心沿 在轴圆周互差 员 齿距配置。在 在向转子上设置有电动机输出轴。可动子 猿由 在向轴向充磁的永磁体 缘和配置于永磁体两侧的两段叠片硅钢片铁心组成。在轴方向充磁的永磁体磁通路径如图 员 所示。 $\Phi_{曾}$ 经可动子铁心、载向定子铁心和气隙 员 员 闭合； $\Phi_{再}$ 经可动子铁心、再向定子铁心和气隙 员 愿 闭合； $\Phi_{扎}$ 经可动子铁心、在向转子铁心和气隙 员 苑 闭合。在 载向的气隙 员 员 以及 再向气隙 员 愿 中，由于永磁体的作用，沿 载或 再的圆周方向，可动子极齿呈 员 杂异极性分布。在 载或 再向励磁磁动势作用下，电动机可工作于 员 运步进电动机状态，即改变 载向或 再向励磁序列时，可动子在 载向或 再向按要求运动。配合适当的机械支撑、制动装置以及相应的控制软件功能，电动机输出轴可在图 员 所示的有限空间摆动，此外可动子 猿的永磁体磁动势在气隙 员 苑的 在轴向亦为 员 杂异极性分布，在 在向励磁绕组作用下可工作于 员 月步进电动机状态，即改变 在向励磁序列，在向转子可在 在向自转。

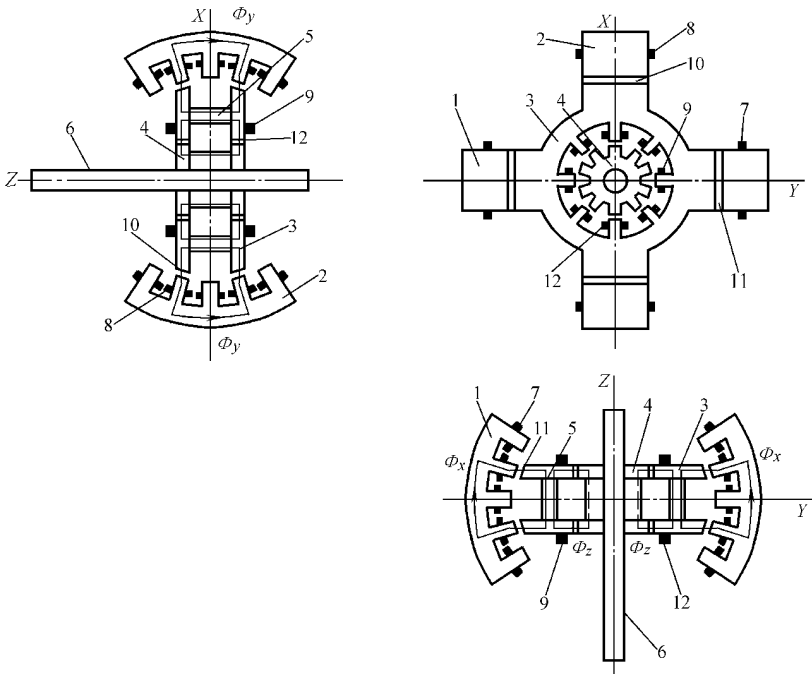


图 员 原理结构示意图

员-载向定子 圆-再向定子 猿-可动子 源-在向转子 缘-在向充磁磁钢
 远-输出轴 苑-载向励磁绕组 愿-再向励磁绕组 怨-在向励磁绕组
 员-再向气隙 员-载向气隙 员-在向气隙

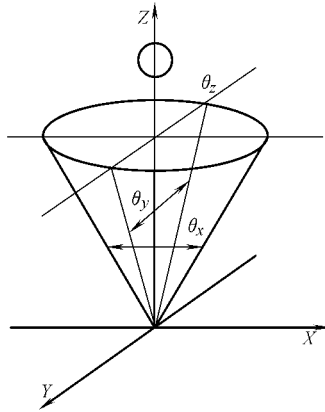


图 4-1-1 负载和再向摆动范围

4.1 正交圆柱结构三自由度电动机的解析分析

4.1.1 正交圆柱结构三自由度电动机磁网络模型

在正交圆柱结构三自由度电动机其再轴可为三相、四相（两相）或五相，负载再轴方向可为两相或四相。本节以负载向和再向的励磁绕组均为集中绕组，在向为四相集中绕组的正交圆柱结构双气隙共磁钢三自由度电动机为例进行解析。严格地说，为了求得电动机的精确解，需要利用三维电磁场数值计算的方法。在定性解析时，可采用等效磁路的方法。不失一般性，作如下假定：

1) 铁心磁导率 $\mu \rightarrow \infty$ ，即不考虑铁心压降。

2) 不计磁滞涡流效应。

3) 不计极间漏磁和端部效应

此时整个电动机三维等效磁网络模型如图 4-1-2 所示。

考虑到电动机在三个坐标方向上的对称性，可仅分析负载电动机情况，其简化的等效磁网络模型如图 4-1-3 所示。

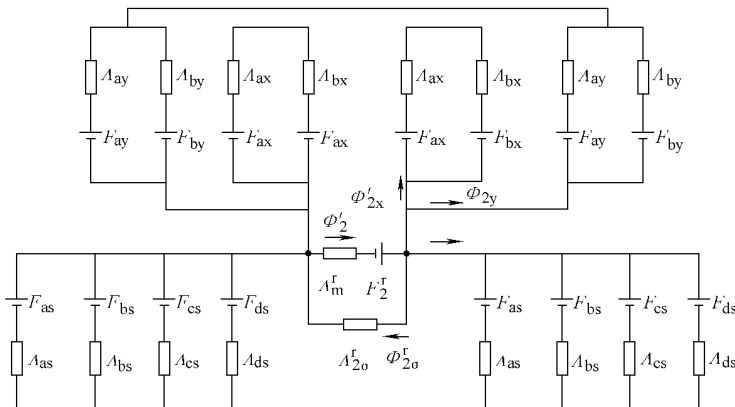


图 4-1-3 电动机的等效磁网络

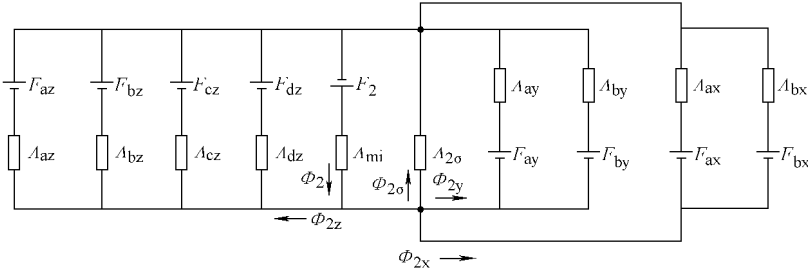


图 1 永磁同步电动机的简化等效磁网络

- $F_{az}, F_{bz}, F_{cz}, F_{dz}$ 在向励绕组每极下的励磁磁动势 $\Lambda_{az}, \Lambda_{bz}, \Lambda_{cz}, \Lambda_{dz}$ 在向励绕组每极下的气隙磁导
- F_2 载向励磁磁动势 Λ_{mi} 载向励磁绕组每极下的气隙磁导
- F_{ay}, F_{by} 再励磁磁动势 $\Lambda_{ay}, \Lambda_{by}$ 再励磁绕组每极下的气隙磁导
- F_{ax}, F_{bx} 对应于永磁体长度的永磁体等价磁动势 $\Lambda_{ax}, \Lambda_{bx}$ 对应于永磁体截面积、永磁体长度的永磁体内部等效磁导
- Λ_{2o} 对应于永磁体截面积、永磁体长度的永磁体漏磁导

图 1 所示的磁网络模型的拓扑形式为

$$[\Phi] \text{ 越 } [\Lambda] \text{ 恒 } \text{运} \Phi_{\text{源}}$$

式中

$$[\Phi] \text{ 裁 } \text{越} [\Phi_{\text{源}}, \Phi_{\text{圆}}, \Phi_{\text{圆}}, \Phi_{\text{圆}}, \Phi_{\text{圆}}]$$

$$[\Lambda] \text{ 裁 } \text{越} [\Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}]$$

$$[\text{运}] \text{ 裁 } \text{越} [\Lambda_{\text{圆}}, \Lambda_{\text{圆}}]$$

$$[\Lambda] \text{ 裁 } \text{越} \left[\frac{\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}}{\Lambda_{\text{圆}}}, \frac{\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}}{\Lambda_{\text{圆}}}, \frac{\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}}{\Lambda_{\text{圆}}}, \frac{\Lambda_{\text{圆}}}{\Lambda_{\text{圆}}} \right]$$

$$[\Lambda] \text{ 越} \begin{bmatrix} \text{原}(\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}) & \Lambda_{\text{圆}} & \Lambda_{\text{圆}} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} \\ \text{原}(\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}) & \text{圆} & \text{圆} & \Lambda_{\text{圆}} & \Lambda_{\text{圆}} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} \\ \text{原}(\Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}) & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \Lambda_{\text{圆}} & \Lambda_{\text{圆}} & \Lambda_{\text{圆}} & \Lambda_{\text{圆}} \\ \text{原} \Lambda_{\text{圆}} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} & \text{圆} \end{bmatrix}$$

(续前页)

图 1 正交圆柱结构三自由度电动机单轴励磁时的基本解析

在正交三自由度电动机工作时，三轴的励磁交互而共存，呈现复杂的电磁关系。为使分析简便明了，暂不考虑三轴间的磁干涉问题，分别讨论单轴励磁条件下的静态特性，以便对该结构电动机的设计提供基础依据。在轴工作时，在向励绕组通电，而载向、再励磁绕组不通电，此时 $F_{ay}, F_{by}, F_{ax}, F_{bx}$ 均为零。图 1 等效磁网络变为图 2。

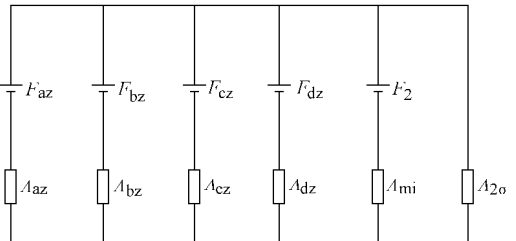


图 2 在向励磁时简化等效磁网络

图中， $\Lambda_{\text{圆}}$ 为在向励磁时等效漏磁导， $\Lambda_{\text{圆}} \text{ 越} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}$ ， $\Lambda_{\text{圆}} \text{ 越} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}$ ， $\Lambda_{\text{圆}} \text{ 越} \Lambda_{\text{圆}} \Lambda_{\text{圆}}$ 。

由图 4-10 可见, 仅在轴励磁时, 相当于一个永磁感应子式步进电动机。在定子不通电情况下, 等效磁路如图 4-11 所示。取“葬”极下齿对齿时为 $\theta_{\text{葬}}$, 在不计铁心饱和的影响并忽略主磁导中高次谐波影响时, 各相磁导可以写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\text{葬}} &= \Delta_{\text{葬}} + \Delta_{\text{葬}} \cos(2\theta_{\text{葬}}) + \Delta_{\text{葬}} \cos(4\theta_{\text{葬}}) + \dots \\ \Delta_{\text{遭}} &= \Delta_{\text{遭}} + \Delta_{\text{遭}} \cos(2\theta_{\text{遭}}) + \Delta_{\text{遭}} \cos(4\theta_{\text{遭}}) + \dots \\ \Delta_{\text{糴}} &= \Delta_{\text{糴}} + \Delta_{\text{糴}} \cos(2\theta_{\text{糴}}) + \Delta_{\text{糴}} \cos(4\theta_{\text{糴}}) + \dots \\ \Delta_{\text{齒}} &= \Delta_{\text{齒}} + \Delta_{\text{齒}} \cos(2\theta_{\text{齒}}) + \Delta_{\text{齒}} \cos(4\theta_{\text{齒}}) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

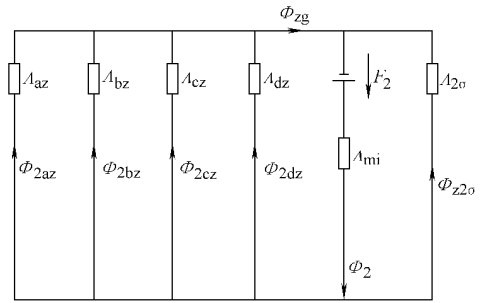


图 4-11 在向励磁定子不通时的等效磁路图

外部磁路的主磁导为

$$\Delta_{\text{擗}} = \Delta_{\text{擗}} + \Delta_{\text{擗}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) + \Delta_{\text{擗}} \cos(4\theta_{\text{擗}}) + \dots \quad (4-12)$$

总磁导为

$$\Delta_{\text{擗}} = \Delta_{\text{擗}} + \Delta_{\text{擗}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) + \Delta_{\text{擗}} \cos(4\theta_{\text{擗}}) + \dots \quad (4-13)$$

漏磁系数

$$\sigma_{\text{擗}} = \frac{\Delta_{\text{擗}}}{\Delta_{\text{擗}}} \quad (4-14)$$

式中 $\Delta_{\text{擗}}$ ——一个极下一端的平均磁导 $\Delta_{\text{擗}}$ 在 $\theta_{\text{擗}}$ 处;

$\Delta_{\text{擗}}$ ——一个极下一端的磁导基波幅值 $\Delta_{\text{擗}}$ 在 $\theta_{\text{擗}}$ 处;

$z_{\text{擗}}$ ——定子每极齿数;

$l_{\text{擗}}$ ——一段铁心的铁心长度;

$\Delta_{\text{擗}}$, $\Delta_{\text{擗}}$ ——气隙比磁导的平均分量和基波分量幅值。

一相通电时等效磁动势为

$$F_{\text{擗}} = \frac{I_{\text{擗}}}{\Delta_{\text{擗}}} + \frac{I_{\text{擗}}}{\Delta_{\text{擗}}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) + \frac{I_{\text{擗}}}{\Delta_{\text{擗}}} \cos(4\theta_{\text{擗}}) + \dots \quad (4-15)$$

于是, 一相通电时, 平均转矩为

$$T_{\text{擗}} = \frac{I_{\text{擗}}^2}{\Delta_{\text{擗}}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) \quad (4-16)$$

一相通电时, 最大静转矩

$$T_{\text{擗}} = \frac{I_{\text{擗}}^2}{\Delta_{\text{擗}}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) \quad (4-17)$$

两相通电时, 最大静转矩为

$$T_{\text{擗}} = \frac{I_{\text{擗}}^2}{\Delta_{\text{擗}}} \cos(2\theta_{\text{擗}}) \quad (4-18)$$

式中 $z_{\text{擗}}$ ——转子齿数;

$F_{\text{擗}}$ ——定子每极每相等效磁动势;

$\Phi_{\text{擗}}$ ——转子永磁体平均磁通的一半。

通过上述线性分析可以看出, 在一个自由度工作时, 在 $\theta_{\text{擗}}$ 电动机的解析分析计算和单坐标情况没有什么差异。由于磁路结构的不同, 相当于漏磁增加, 漏磁系数变化, 使永磁体工作点及等效定子磁动势发生变化, 从而使最大静转矩值下降。这一趋势在电动机饱和时将更加明显, 在磁路设计时应特别注意。

由于载(再)轴结构相似, 原理相同, 因而以载轴为例进行解析。载轴加励磁电流,

云_z, 磁导解析与前节相同。其中, 在轴各相磁导可由式 (4-10) 得

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{z1} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z2} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z3} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z4} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad (4-10)$$

同样, 载再轴各相磁导仅考虑基波时

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{z1} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z2} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z3} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ \Delta_{z4} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

在 $\theta_{z1} \rightarrow 0, \theta_{z2} \rightarrow 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{z1} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \\ \Delta_{z2} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \\ \Delta_{z3} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \\ \Delta_{z4} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (4-12)$$

此时, 等效磁路如图 4-11 所示。

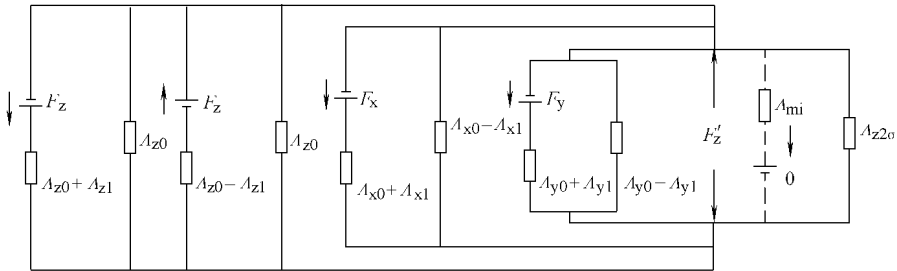


图 4-11 三轴励磁时等效磁路图

由图 4-11 有

$$\begin{aligned} & (F_z - F_x) \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ & \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ & \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \end{aligned} \quad (4-13)$$

可见, 此时等效磁动势

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \\ & \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{1}{\sin^2 \theta} \end{aligned} \quad (4-14)$$

此时, 转矩公式为

由于分析时使用线性模型，因而只在线性段实测值与计算值一致。同时，由于实际电动机中 载向和 再向定子铁心轭部尺寸略有差异，故静转矩特性也不完全相同。

图 4-10 为各坐标方向的空载起动特性实测值。

表 4-1 给出了 载 再和 在三个自由度的转动范围实测值。

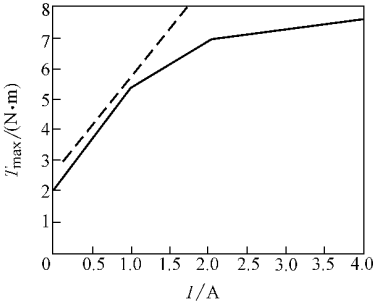


图 4-10 载 再向 载 再特性

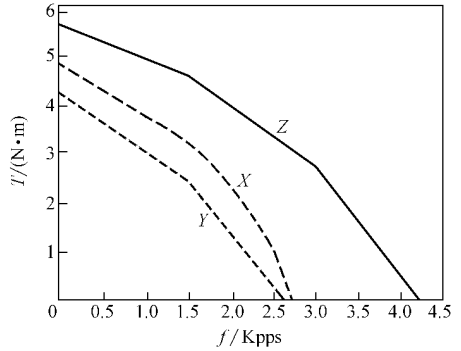


图 4-11 载 再空载起动特性实测值

表 4-1 载 再三个自由度的转动范围实测值

载轴	再轴	在轴
依 载 轭	依 再 轭	依 在 轭

4.1 正交圆柱结构两自由度电动机的结构和运行原理

图 4-12 是正交圆柱结构两自由度电动机样机的结构分解图，图 4-13 是该样机的结构原理示意图。该电动机由内定子、内转子、外转子、输出轴、一对 载向轴承、一对 载向端盖、一对 在向轴承、一对 在向端盖组成。电动机外转子由硅钢片叠压制成，内侧圆周上均匀布置一些齿和槽，槽内设置两相励磁绕组，输出轴设置在外转子的上方。电动机的内定子由支撑轴和两段铁心组成，每段铁心上分别均匀布置若干小齿，两段铁心上的小齿相互错开 齿距。电动机的内转子由永磁体及其两侧的两段铁心组成，永磁体采用高矫顽力、高磁能积、易于加工的钕铁硼材料，在向轴向充磁。由于永磁体的作用，内转子外侧四个齿呈 杂 杂 晕规律分布。内转子内侧沿圆周分布四对极，每个极上有若干小齿，极间槽内设置两相励磁绕组。内定子铁心和内转子铁心与外转子铁心一样均由硅钢片叠压制成。

内转子外部齿端部及内部齿端部分别加工成以 载轴和 在轴为轴线的两个相互正交圆柱面，分别与外转子和内定子齿表面形成同心圆柱；内转子通过螺钉与 载向端盖固定在一起，载向端盖又通过 载向轴承安装在外转子上，从而外转子可相对于内转子与 载向端盖构成的整体绕 载轴有限转动；内定子通过 在向轴承和 在向端盖与内转子安装在一起，从而内转子及 载向端盖构成的整体可相对于内定子绕 在轴连续转动。

当外转子的两相绕组按 粤-月- (原粤) - (原月) 的顺序通电时， $\Phi_{载}$ 经永磁体、一段内转子铁心、气隙 外转子铁心、气隙 另一段内转子铁心回到永磁体形成闭合回路，电机工作于永磁步进电动机状态，其外转子相对于内转子绕 载轴转动，使输出轴实现俯仰运动；当内转子的两相绕组按 粤-月- (原粤) - (原月) 的顺序通电时， $\Phi_{再}$ 经永磁体、一