

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

XINXING DIANQUODONG KONGZHI XITONG
JIQI XIANGGUAN JISHU

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
CHINA MACHINE PRESS



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、“863”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 HB 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（CIP）数据

新型电驱动控制系统及其相关技术/程树康等著. —北京：机械工业出版社，2005.6

ISBN 7-111-16600-0

I. 新… II. 程… III. 圆柱型直线电动机 IV. TM359.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 051811 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

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：石 冉

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18.75 印张·460 千字

定价：35.00 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（010）68326294

封面无防伪标均为盗版

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本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、863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 50277008),“实用性三自由度伺服电动机”(项目编号 863-512-02-11),“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 863-512-08-07),“直接驱动电机及其控制系统”(项目编号 863-512-12-05),“解放牌混合动力城市客车电机及其控制系统”(项目编号 2001AA501513),“红旗牌混合动力轿车电机及其控制系统”(项目编号 2003AA501324),“电动汽车(概念车)电气系统总体研究及其车辆管理单元(VMU)研制”(项目编号 96-A04-01-01),“具有多种感知功能多手指仿人

灵巧手及其远程遥控作业的研究”(项目编号 863-512-9924-03),“以超级电容器为能源的电动车”(项目编号 2002AA001028),“以电容为能源的电动公交客车”(项目编号 GA02A201),“电动车用新型直接驱动电机”(项目编号 97-41 G97A14-4)等。其目的在于探求具有自主知识产权的新型电驱动控制系统的构成、原理、设计思想、性能特点、研究分析方法及相关技术。本书是作者围绕新结构、新原理、新材料电机多年科研工作的总结。

全书共分 4 篇。第 1 篇介绍正交圆柱结构多自由度电动机系统;第 2 篇介绍混合磁路多边耦合电机系统;第 3 篇介绍多重气隙电机系统;第 4 篇介绍特种结构直线电驱动系统。

本书由程树康博士和蔡鹤皋院士执笔。崔淑梅博士、郑萍博士、宋立伟博士、柴凤博士、张千帆博士、寇宝泉博士、邹继明博士、吴红星博士、谢宗武博士等参加了相关的研究工作,并提供了不同章节的初稿。裴宇龙、吴世华博士研究生参加了本书的编辑和整理。

限于时间和作者的学识水平,书中难免会有不当或错误之处,敬请指正。

作 者

2004 年 5 月

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	3
1.3 正交圆柱结构三自由度电动机的力能指标	8
1.4 正交圆柱结构两自由度电动机的结构和运行原理	9
1.5 正交圆柱结构两自由度电动机的参数	11
第 2 章 正交圆柱结构三自由度电动机的驱动控制系统	13
2.1 正交圆柱结构三自由度电动机驱动控制系统的构成	13
2.2 相位时序控制电路的设计及原理	13
2.3 相电流控制电路的设计及原理	14
2.4 前级驱动电路设计及原理	16
2.5 主电路的设计及原理	16
2.6 保护电路的设计和原理	21
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	22
3.1 正交圆柱结构三自由度电动机系统的数学模型	22
3.2 正交圆柱结构三自由度电动机绕组电流分析	26
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	30
第 4 章 软性故障诊断法及在正交圆柱结构三自由度电动机系统中的应用	36
4.1 概述	36
4.2 电机系统软性故障的界定	37
4.3 电机系统软性故障诊断法的探讨	39
4.4 步进电动机系统典型软性故障的描述	41
4.5 低频振荡软性故障的分析	42
4.6 电机系统软性故障诊断法中自恢复控制策略的探索	48
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	50
5.1 概述	50
5.2 正交圆柱结构二自由度电动机等效磁路模型	50
5.3 正交圆柱结构二自由度电动机磁路模型的变换	52
5.4 正交圆柱结构二自由度电动机磁导的计算	53
5.5 正交圆柱结构二自由度电动机气隙磁场的计算	56
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	58
第 6 章 多自由度电动机运动学分析	60
6.1 概述	60

6.2 多自由度电动机位姿的描述	60
6.3 运动学方程的建立方法	61
6.4 多自由度电动机运动学方程	63
6.5 多自由度电动机运动学逆问题	67
6.6 多自由度电动机的雅可比矩阵的定义及求解方法	71
6.7 多自由度电动机的雅可比矩阵	73
6.8 多自由度电动机的雅可比矩阵的伪逆	75
第7章 多自由度电动机轨迹规划算法及仿真	78
7.1 概述	78
7.2 多自由度电动机运动特点分析	78
7.3 连续轨迹运动的描述形式及变换	80
7.4 等时间间隔的轨迹规划算法	82
7.5 等运动弧长的轨迹规划算法	84
7.6 轨迹规划仿真实例	85
第2篇 混合磁路多边耦合电机系统	89
第1章 混合磁路多边耦合电机	89
1.1 永磁感应子式步进电动机的磁场解析	89
1.2 混合磁路多边耦合电机的结构	91
1.3 混合磁路多边耦合电机的磁场解析	93
1.4 混合磁路多边耦合电机的静转矩解析	94
第2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	97
2.1 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	97
2.2 模型的轴向磁场分布计算及实验研究	101
第3章 混合磁路多边耦合电机轴向磁场分布的分析研究	104
3.1 混合磁路多边耦合电机永磁体的配置	104
3.2 混合磁路多边耦合电机轴向励磁线圈的轴向长度	105
3.3 混合磁路多边耦合电机铁心叠长	111
第4章 混合磁路多边耦合电机的模型及特性计算	113
4.1 概述	113
4.2 混合磁路多边耦合电机的结构模型	113
4.3 混合磁路多边耦合电机的三维磁场模型	114
4.4 混合磁路多边耦合电机的特性计算	120
第5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	124
5.1 概述	124
5.2 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	124
5.3 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	126
第6章 混合磁路多边耦合电动机磁系统的分析研究	132
6.1 混合磁路多边耦合电动机齿层磁参量的计算与非线性磁网络模型的建立	132
6.2 混合磁路多边耦合电动机特性及参数的计算	137
第7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	140
7.1 概述	140

7.2 轴径向气隙结构混合磁路多边形耦合电动机谐波反电动势的解析分析	140
7.3 轴径向气隙结构混合磁路多边形耦合电动机谐波反电动势的仿真	145
第3篇 多重气隙电机系统	149
第1章 多重气隙永磁一体化电机原理结构及数学模型	149
1.1 概述	149
1.2 多重气隙永磁一体化启动-发电机的原理	149
1.3 多重气隙永磁一体化启动-发电机的等效磁路	151
1.4 多重气隙永磁一体化启动-发电机的结构设计	152
1.5 多重气隙永磁一体化启动-发电机的控制系统	154
第2章 多重气隙永磁一体化电机电磁转矩分析	159
2.1 概述	159
2.2 多重气隙永磁同步电动机的电磁转矩分析	159
2.3 多重气隙永磁无刷直流电动机的电磁转矩分析	163
2.4 多重气隙永磁电机电磁转矩实验研究	166
第3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	169
3.1 概述	169
3.2 多重气隙永磁电机定位力矩的产生机理	170
3.3 多重气隙永磁电机定位力矩的解析分析	172
3.4 影响多重气隙永磁电机定位力矩波形的因素	176
3.5 多重气隙电机定位力矩的实验研究	181
第4章 多重气隙永磁一体化电机性能计算及结构参数分析	183
4.1 概述	183
4.2 多重气隙永磁发电机性能分析	183
4.3 多重气隙永磁电机矩角特性	187
第5章 多重气隙永磁电机控制策略	194
5.1 多重气隙永磁电机控制系统分析	194
5.2 多重气隙永磁电机控制系统设计	195
5.3 电流调节器和速度调节器的数字实现	201
第6章 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的转矩特性	203
6.1 概述	203
6.2 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的结构	203
6.3 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的转矩解析	204
6.4 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	208
第7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	210
7.1 概述	210
7.2 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的定位转矩分析	210
7.3 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	214
7.4 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	218
第8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	220
8.1 概述	220
8.2 串联磁路结构多重气隙混合式电动机的数学模型	220

8.3 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	222
8.4 串联磁路结构多重气隙混合式电动机电感的分析与测量	224
第4篇 特种结构直线电驱动系统	231
第1章 错片结构直线步进电动机	231
1.1 错片结构直线步进电动机的结构及工作原理	231
1.2 错片结构直线步进电动机的线性解析分析	232
1.3 错片结构直线步进电动机的优化	235
1.4 错片结构直线步进电动机轴向磁场分布	238
第2章 HB型共永磁体二自由度平面直线电动机	242
2.1 概述	242
2.2 HB型共永磁体二自由度平面直线电动机结构与原理	242
2.3 HB型共永磁体二自由度平面直线电动机基本解析分析	243
2.4 二自由度平面直线电动机磁干涉的研究	249
第3章 混合式直线步进电动机的磁系统分析	251
3.1 概述	251
3.2 混合式直线步进电动机齿层比磁导法的深入研究	251
3.3 齿层比磁导法和气隙比磁导法的分析对比	253
第4章 混合磁路多边耦合直线推进器	258
4.1 概述	258
4.2 混合磁路多边耦合直线推进器的结构和工作原理	258
4.3 混合磁路多边耦合直线推进器的数学模型	259
4.4 混合磁路多边耦合直线推进器的实验研究	261
第5章 微型直线驱动器用驱动系统的设计与分析	263
5.1 无刷直流电动机驱动系统的总体结构	263
5.2 电动机驱动主电路的设计及原理	263
5.3 保护电路的设计及原理	264
5.4 逻辑电路的设计及原理	266
5.5 换相信号处理电路的设计及原理	267
5.6 电机系统的特性	267
第6章 微型直线驱动系统的数学模型及控制策略	270
6.1 机器人手指关节的组成及工作原理	270
6.2 机器人手指关节用直线驱动器的特点	271
6.3 微型直线驱动器的数学模型	272
6.4 微型直线驱动器的参数辨识	275
6.5 微型直线驱动器的滑模变结构控制策略	276
第7章 微型直线驱动器用无刷直流电动机的设计与分析	280
7.1 直线驱动器用无刷直流电动机的设计特点	280
7.2 直线驱动器用无刷直流电动机的磁场分析	281
7.3 直线驱动器用无刷直流电动机转子位置传感器	284
参考文献	286

第1篇 多自由度电动机系统

第1章 正交圆柱结构多自由度电动机及其线性解析

本章介绍一种非球形结构的多自由度电动机，其意图在于利用传统电动机的圆柱结构、工艺，通过合理的磁路配置，实现三个自由度的运动。该电动机结构上三个圆柱正交配置，利用一块共用磁钢，形成双气隙，从而构成一种正交圆柱结构双气隙共磁钢三自由度电动机（简称ZSHG三自由度电动机），电动机本体与各轴的驱动器和控制器构成整个电动机系统。

1.1 正交圆柱结构三自由度电动机系统构成及工作原理

1.1.1 正交圆柱结构三自由度电动机系统构成

ZSHG三自由度电动机系统由电动机本体、支撑及制动部件、X轴驱动器、Y轴驱动器、Z轴驱动器及控制器六部分构成，如图1-1-1所示。

系统在控制器的控制下，实现三个坐标方向的运动。电动机可实现X轴、Z轴同时旋转，Y轴、Z轴同时旋转。当X轴旋转时，控制器控制X轴的支撑制动部分处于锁定状态；当Y轴工作时，控制器控制Y轴的支撑制动部分处于锁定状态。X轴、Y轴、Z轴均可独立控制。

实际样机照片如图1-1-2所示。

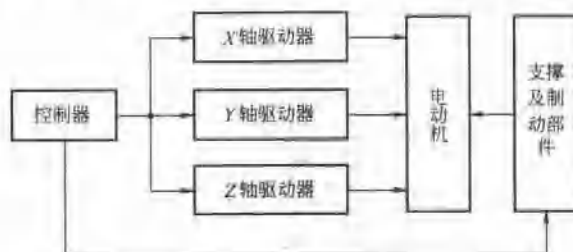


图 1-1-1 电动机系统构成



图 1-1-2 样机

1.1.2 正交圆柱结构三自由度电动机及原理

ZSHC 三自由度电动机原理结构示意图如图 1-1-3 所示。电动机由 X 向定子部件 1、 Y 向定子部件 2、可动部件 3 和 Z 向转子部件 4 组成。可动子 3 在 X 、 Y 、 Z 三个方向上加工为正交的圆柱形,分别与部件 1、2 和 4 的相应圆柱表面构成同心圆柱。气隙 11、10 和 12 分别介于部件 3 和 1、部件 3 和 2 及部件 3 和 4 之间。 X 向和 Y 向定子部件由叠片硅钢片构成,铁心上沿 X 轴和 Y 轴的圆柱和圆周按一定规律开有齿槽。槽内分别设置 X 向和 Y 向的多相励磁绕组。 Z 向转子使用叠片硅钢片,组成两段 Z 向转子铁心,铁心外圆上开有若干小齿。两段铁心沿 Z 轴圆周互差 $1/2$ 齿距配置。在 Z 向转子上设置有电动机输出轴。可动子 3 由 Z 向轴向充磁的永磁体 5 和配置于永磁体两侧的两段叠片硅钢片铁心组成。 Z 轴方向充磁的永磁体磁通路径如图 1-1-3 所示。 Φ_x 经可动子铁心、 X 向定子铁心和气隙 11 闭合; Φ_y 经可动子铁心、 Y 向定子铁心和气隙 10 闭合; Φ_z 经可动子铁心、 Z 向转子铁心和气隙 12 闭合。在 X 向的气隙 11 以及 Y 向气隙 10 中,由于永磁体的作用,沿 X 或 Y 的圆周方向,可动子极齿呈 N、S 异极性分布。在 X 或 Y 向励磁磁动势作用下,电动机可工作于 PM 步进电动机状态,即改变 X 向或 Y 向励磁序列时,可动子在 X 向或 Y 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 1-1-4 所示的有限空间摆动,此外可动子 3 的永磁体磁动势在气隙 12 的 Z 轴向亦为 N、S 异极性分布,在 Z 向励磁绕组作用下可工作于 HB 步进电动机状态,即改变 Z 向励磁序列, Z 向转子可在 Z 向自转。

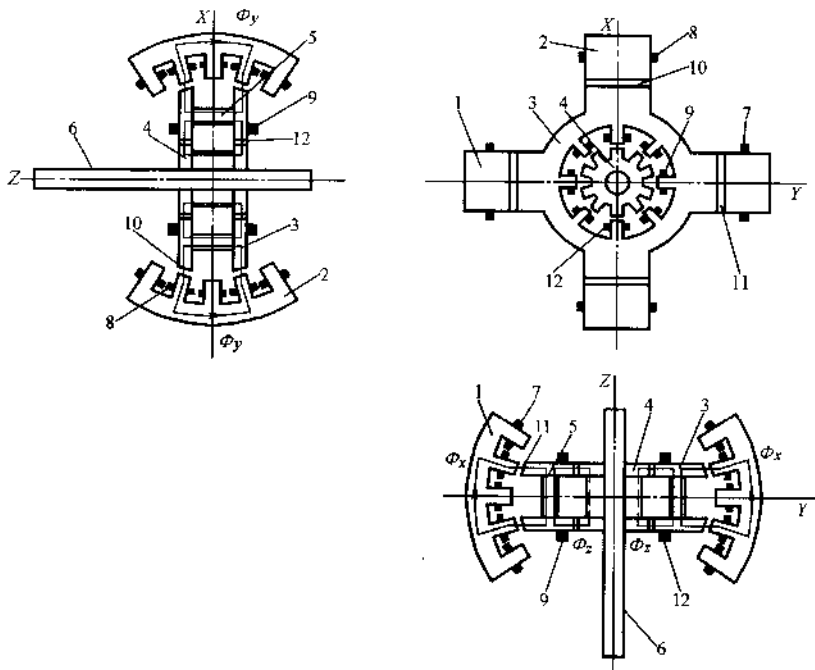


图 1-1-3 原理结构示意图

- 1— X 向定子 2— Y 向定子 3—可动子 4— Z 向转子 5— Z 轴向充磁永磁体
6—输出轴 7— X 向励磁绕组 8— Y 向励磁绕组 9— Z 向励磁绕组
10— Y 向气隙 11— X 向气隙 12— Z 向气隙

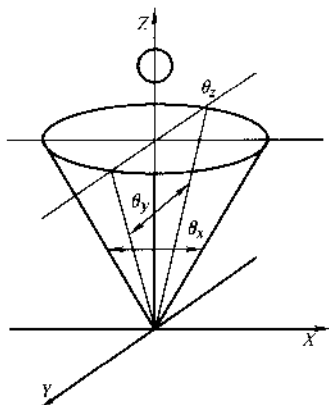


图 1-1-4 X 和 Y 向摆动范围

1.2 正交圆柱结构三自由度电动机的解析分析

1.2.1 正交圆柱结构三自由度电动机磁网络模型

ZSHG 三自由度电动机其 Z 轴可为三相、四相（两相）或五相， X 、 Y 轴方向可为两相或四相。本节以 X 向和 Y 向的励磁绕组均为集中绕组， Z 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 $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ，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 1-1-5 所示。

考虑到电动机在三个坐标方向上的对称性，可仅分析 1/4 电动机的情况，其简化的等效磁网络模型如图 1-1-6 所示。

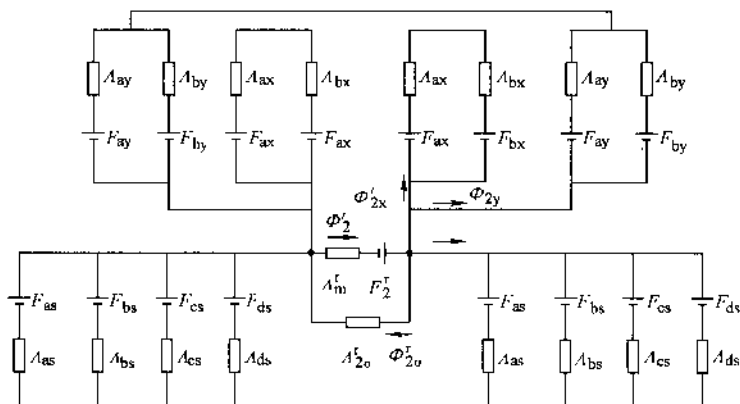


图 1-1-5 电动机的等效磁网络

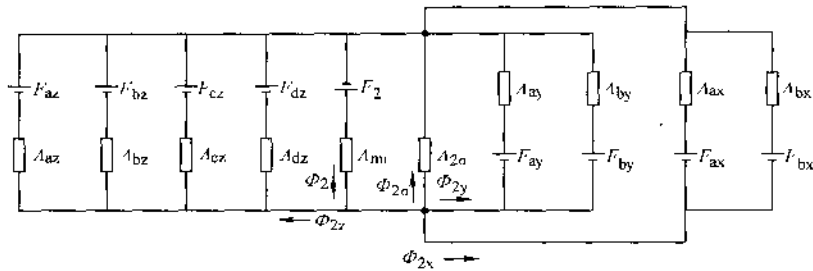


图 1-1-6 1/4 电动机的简化等效磁网络

$F_{az}, F_{bz}, F_{cz}, F_{dz}$ —Z 向每相每极的励磁磁动势 $\Delta_{az}, \Delta_{bz}, \Delta_{cz}, \Delta_{dz}$ —Z 向每相每极下的气隙磁导

F_{ax}, F_{bx} —X 向每相每极的励磁磁动势 Δ_{ax}, Δ_{bx} —X 向每相每极下的气隙磁导

F_{ay}, F_{by} —Y 向每相每极的励磁磁动势 Δ_{ay}, Δ_{by} —Y 向每相每极下的气隙磁导

F_2 —对应于 1/2 永磁体长度的永磁体等价磁动势 Δ_{mi} —对应于 1/2 永磁体截面积、1/2 永磁体长度的永磁体内部等价磁导

$\Delta_{2\sigma}$ —对应于 1/2 永磁体截面积、1/2 永磁体长度的永磁体漏磁导

图 1-1-6 所示的磁网络模型的拓扑形式为

$$[\Phi] = [A][F] + [K]\Phi_2$$

式中

$$\begin{aligned} [\Phi]^T &= [\Phi_{2x}, \Phi_{2y}, \Phi_{2z}, \Phi_{2\sigma}] \\ [F]^T &= [F_2, F_{ax}, F_{bx}, F_{ay}, F_{by}, F_{az}, F_{bz}, F_{cz}, F_{dz}] \\ [K]^T &= [\Delta_{ax} + \Delta_{bx}] \\ [A]^T &= \begin{bmatrix} \frac{\Delta_{ax} + \Delta_{bx}}{\Delta_{mi}}, \frac{\Delta_{ay} + \Delta_{by}}{\Delta_{mi}}, \frac{\Delta_{az} + \Delta_{bz} + \Delta_{cz} + \Delta_{dz}}{\Delta_{mi}}, \frac{\Delta_{2\sigma}}{\Delta_{mi}} \\ -(\Delta_{ax} + \Delta_{bx}) & \Delta_{ax} & \Delta_{bx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\Delta_{ay} + \Delta_{by}) & 0 & 0 & \Delta_{ay} & \Delta_{by} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\Delta_{az} + \Delta_{bz} + \Delta_{cz} + \Delta_{dz}) & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta_{az} & \Delta_{bz} & \Delta_{cz} & \Delta_{dz} \\ -\Delta_{2\sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

1.2.2 正交圆柱结构三自由度电动机单轴励磁时的基本解析

ZSHG 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设计提供基础依据。Z 轴工作时，Z 向励磁绕组通电，而 X 向、Y 向励磁绕组不通电，此时 $F_{ax}, F_{bx}, F_{ay}, F_{by}$ 均为零。图 1-1-6 等效磁网络变为图 1-1-7。

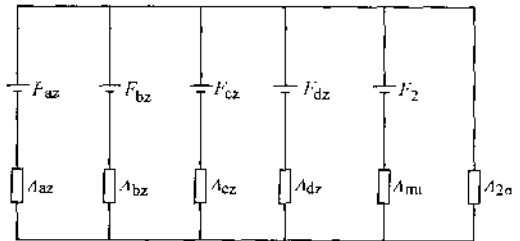


图 1-1-7 Z 向励磁时简化等效磁网络

图中， $\Delta_{2\sigma}$ 为 Z 向励磁时等效漏磁导， $\Delta_{2\sigma} = \Delta_x + \Delta_y + \Delta_{2\sigma}$ ， $\Delta_x = \Delta_{ax} + \Delta_{bx}$ ， $\Delta_y = \Delta_{ay} + \Delta_{by}$ 。

由图 1-1-7 可见, 仅 Z 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 1-1-8 所示。取“a”极下齿对齿时为 $\theta_{ze} = 0$, 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

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{az} &= \Lambda_{z0} + \Lambda_{z1} \cos \theta_{ze} \\ \Lambda_{bz} &= \Lambda_{z0} + \Lambda_{z1} \cos \left(\theta_{ze} - \frac{\pi}{2} \right) \\ \Lambda_{cz} &= \Lambda_{z0} + \Lambda_{z1} \cos (\theta_{ze} - \pi) \\ \Lambda_{dz} &= \Lambda_{z0} + \Lambda_{z1} \cos \left(\theta_{ze} - \frac{3}{2}\pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

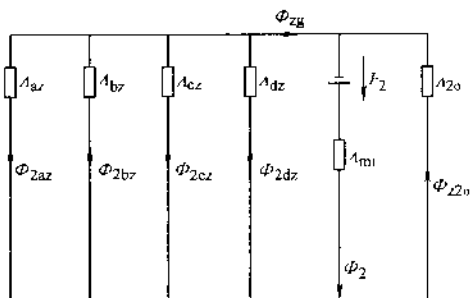


图 1-1-8 Z 向励磁定子不通时的等效磁路图

外部磁路的主磁导为

$$\Lambda_{zg} = \Lambda_{az} + \Lambda_{bz} + \Lambda_{cz} + \Lambda_{dz} = 4\Lambda_{z0} \quad (1-1-3)$$

总磁导为

$$\Lambda_{z\Sigma} = \Lambda_{zg} + \Lambda_{z2\sigma} \quad (1-1-4)$$

漏磁系数

$$K_{zs} = \frac{\Lambda_{zg}}{\Lambda_{zg} + \Lambda_{z2\sigma}} \quad (1-1-5)$$

式中 Λ_{z0} ——一个极下一端的平均磁导 $\Lambda_{z0} = Z_{zs} G_{z0} l_z$;

Λ_{z1} ——一个极下一端的磁导基波幅值 $\Lambda_{z1} = Z_{zs} G_{z1} l_z$;

Z_{zs} ——定子每极齿数;

l_z ——一段铁心的铁心长度;

G_{z0} , G_{z1} ——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

$$F_{1z}' = \frac{2\Lambda_{z1}}{4\Lambda_{z0} + \Lambda_{z2\sigma}} F_{1z} = \frac{\Lambda_{z1}}{2K_{zs}\Lambda_{z0}} F_{1z} = \frac{G_{z1}}{2K_{zs}G_{z0}} F_{1z} = F_{1z} \quad (1-1-6)$$

于是, 一相通电时, 平均转矩为

$$T_{z0} = \frac{8}{\pi} Z_{zt} F_{1z}' \Phi_{2z} \quad (1-1-7)$$

一相通电时, 最大静转矩

$$T_{z1} = 4Z_{zt} F_{1z}' \Phi_{2z} \quad (1-1-8)$$

两相通电时, 最大静转矩为

$$T_{z2} = 4\sqrt{2}Z_{zt} F_{1z}' \Phi_{2z} \quad (1-1-9)$$

式中 Z_{zt} ——转子齿数;

F_{1z}' ——定子每极每相等效磁动势;

Φ_{2z} ——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, ZSHG 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 X (Y) 轴结构相似, 原理相同, 因而以 X 轴为例进行解析。X 轴加励磁电流,

Y、Z 轴无励磁电流，此时 F_{ay} 、 F_{by} 、 F_{az} 、 F_{bz} 、 F_{cz} 、 F_{dx} 均为零，其等效磁网络模型变为图 1-1-9。

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{x2\sigma} &= \Lambda_{2\sigma} + \Lambda_z + \Lambda_y \\ \Lambda_z &= \Lambda_{az} + \Lambda_{bz} + \Lambda_{cz} + \Lambda_{dx} \\ \Lambda_y &= \Lambda_{ay} + \Lambda_{by} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

定子电流为零时等效磁路如图 1-1-10 所示。

图中， Λ_{xg} 为主磁导， $\Lambda_{xg} = \Lambda_{ax} + \Lambda_{bx}$ 。

主磁导与漏磁导之和为外部磁路的总磁导，即

$$\Lambda_{x\Sigma} = \Lambda_{xg} + \Lambda_{x2\sigma} \quad (1-1-11)$$

从等效磁路可以看出，仅考虑单轴励磁时，磁路模型与传统单坐标电动机没有变化，与上节分析相似，只是磁路参数出现变化，可以方便得到其平均转矩为

$$T_{x0} = \frac{4}{\pi} p_x^2 F_{1x}' \Phi_{2x} \quad (1-1-12)$$

对于斜槽，平均转矩或最大静转矩的值将有所下降

$$T_{xk0} = K_{x1} \frac{4}{\pi} p_x^2 F_{1x}' f_{2x} \quad (1-1-13)$$

式中 p_x ——转子极对数；

F_{1x}' ——每极定子等效磁动势；

Φ_{2x} ——由空载工作点所决定的永磁体内的每极磁通；

K_{x1} ——比例系数

$$K_{x1} = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} K_{sk} \frac{\sin \alpha_p \pi / 2}{\alpha_p \pi / 2} \quad (1-1-14)$$

K_{sk} ——基波的斜槽系数

$$K_{sk} = \frac{\sin (\pi / 4 \cdot \beta / t_1)}{\pi / 4 \cdot \beta / t_1} \quad (1-1-15)$$

α_p ——转子极弧系数，即磁极宽度与极距的比值；

β ——斜槽斜过的距离，在定子表面衡量，并取与定子齿距 t_1 相同的单位。

1.2.3 正交圆柱结构三自由度电动机三轴励磁时的基本解析

正交圆柱结构双气隙共永磁体三自由度电动机实际工作时，其 X 轴和 Y 轴中某一轴处于锁定状态，即绕组以当时状态通以恒定电流，而另一轴和 Z 轴则处于励磁状态，按一定逻辑在各轴的对应绕组中通以电流。也就是说，空间三个自由度配置的励磁绕组均处于通电状态，其中二轴由于运动其失调角也处于变化状态，这使得解析分析复杂化。本节以特定工作状态为例，探求其静态特性。

设 X 轴处于 A 相锁定，Y 轴和 Z 轴处于励磁状态，均为 A 相通电状态，且失调角 $\theta_{ex} = 0$ ， $\theta_{ey} = 0$ ， $\theta_{ez} = 0$ 。

此时，图 1-1-6 中， $F_{bz} = F_{dz} = 0$ ， $F_{by} = 0$ ， $F_{bx} = 0$ ， $F_{az} = F_{cz} = F_z$ ， $F_{ay} = F_y$ ， $F_{ax} =$

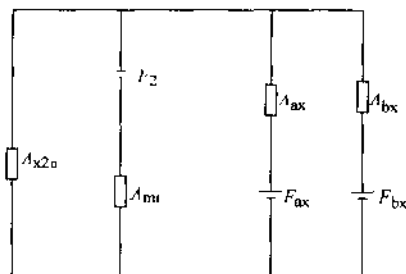


图 1-1-9 X 轴简化等效磁网络模型

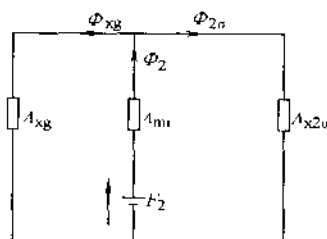


图 1-1-10 X 轴定子电流为零时等效磁路图

F_x , 磁导解析与前节相同。其中, Z 轴各相磁导可由式 (1-1-2) 得

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{az} &= \Lambda_{z0} + \Lambda_{z1} \\ \Lambda_{bz} &= \Lambda_{z0} \\ \Lambda_{cz} &= \Lambda_{z0} - \Lambda_{z1} \\ \Lambda_{dz} &= \Lambda_{z0} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-16)$$

同样, X 、 Y 轴各相磁导仅考虑基波时

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{ax} &= \Lambda_{x0} + \Lambda_{x1} \cos \theta_{xe} \\ \Lambda_{bx} &= \Lambda_{x0} + \Lambda_{x1} \cos (\theta_{xe} - \pi) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-17)$$

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{ay} &= \Lambda_{y0} + \Lambda_{y1} \cos \theta_{ye} \\ \Lambda_{by} &= \Lambda_{y0} + \Lambda_{y1} \cos (\theta_{ye} - \pi) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-18)$$

在 $\theta_{xe} = 0$, $\theta_{ye} = 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{ax} &= \Lambda_{x0} + \Lambda_{x1} \\ \Lambda_{bx} &= \Lambda_{x0} - \Lambda_{x1} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-19)$$

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{ay} &= \Lambda_{y0} + \Lambda_{y1} \\ \Lambda_{by} &= \Lambda_{y0} - \Lambda_{y1} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-20)$$

此时, 等效磁路如图 1-1-11 所示。

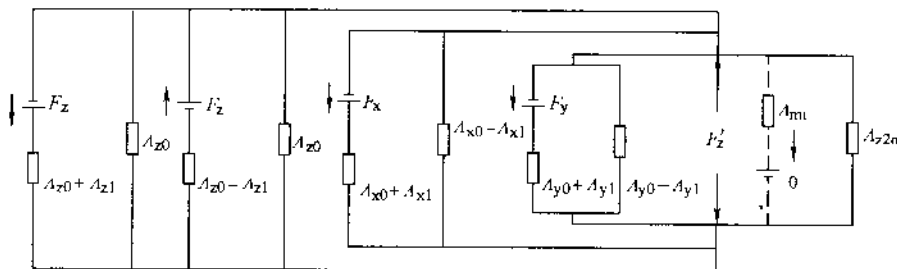


图 1-1-11 三轴励磁时等效磁路图

由图 1-1-11 有

$$\begin{aligned} & (F'_z - F_z) (\Lambda_{z0} + \Lambda_{z1}) + (F'_z + F_z) (\Lambda_{z0} - \Lambda_{z1}) \\ & + (F'_x - F_x) (\Lambda_{x0} + \Lambda_{x1}) + (F'_x + F_x) (\Lambda_{x0} - \Lambda_{x1}) \\ & + F'_z (2\Lambda_{z0} + \Lambda_{x0} - \Lambda_{x1} + \Lambda_{y0} - \Lambda_{y1} + \Lambda_{z2\sigma}) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (1-1-21)$$

可见, 此时等效磁动势

$$\begin{aligned} F'_z &= \frac{2\Lambda_{z0}}{4\Lambda_{z0} + 2\Lambda_{x0} + 2\Lambda_{y0} + \Lambda_{z2\sigma}} F_z + \frac{\Lambda_{x0} + \Lambda_{x1}}{4\Lambda_{z0} + 2\Lambda_{x0} + 2\Lambda_{y0} + \Lambda_{z2\sigma}} F_x \\ &+ \frac{\Lambda_{y0} + \Lambda_{y1}}{4\Lambda_{z0} + 2\Lambda_{x0} + 2\Lambda_{y0} + \Lambda_{z2\sigma}} F_y \end{aligned} \quad (1-1-22)$$

此时, 转矩公式为

$$T_{1z}=4Z_{rz}\Phi_{2z}\left\{\begin{aligned}&\frac{2\Lambda_{x0}}{4\Lambda_{x0}+2\Lambda_{x0}+2\Lambda_{y0}+\Lambda_{z2\sigma}}F_z+\frac{\Lambda_{x0}+\Lambda_{x1}}{4\Lambda_{x0}+2\Lambda_{x0}+2\Lambda_{y0}+\Lambda_{z2\sigma}}F_x\\&+\frac{\Lambda_{y0}+\Lambda_{y1}}{4\Lambda_{x0}+2\Lambda_{x0}+2\Lambda_{y0}+\Lambda_{z2\sigma}}F_y\end{aligned}\right\}\quad (1-1-23)$$

式 1-1-23 是特定状态的讨论，其他状态可用类似方法推出。可以看出，各轴的静转矩不仅和本轴的磁路参数有关，而且还和其他两轴的磁路参数有关，即正交圆柱结构双气隙共永磁体三自由度电动机存在磁耦合（或磁路干扰），这是与单轴电动机的不同之处。式 1-1-23 提供了这种电动机静转矩的计算依据，同时可以看出，由于存在三轴间的磁耦合，这种电动机在用于位置或速度等精度要求较高的系统中应充分考虑磁干涉的影响。

1.3 正交圆柱结构三自由度电动机的力能指标

作者在理论分析的基础上，结合“863”课题研制实验样机，设计研制驱动控制器，构成了实际电动机系统，并对具体尺寸样机进行了计算和实验评价，收到满意效果。X、Y、Z 轴最大静转矩特性数据如表 1-1-1、表 1-1-2、表 1-1-3 所示。

表 1-1-1 X 轴最大静转矩实测值

I/A	0	1	2	3	4	5	6	7
$T/N\cdot m$	0.86	2.5	4.7	5.9	6.7	7.4	7.7	8.0

表 1-1-2 Y 轴最大静转矩实测值

I/A	0	1	2	3	4	5	6	7
$T/N\cdot m$	0.74	2.2	3.6	4.8	5.4	6.0	6.5	7.0

表 1-1-3 Z 轴最大静转矩实测值

I/A	0	1	2	3	4	5
$T/N\cdot m$	2.1	5.4	6.9	7.3	7.5	6.3

图 1-1-12、图 1-1-13、图 1-1-14 分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴方向最大静转矩特性，实线为测试值，虚线为理论计算值。

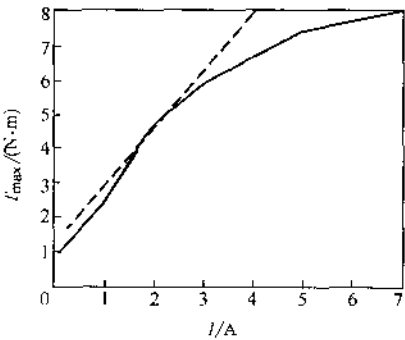


图 1-1-12 X 向 $T_{\max}$ - I 特性

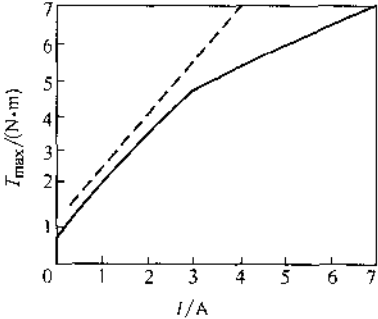


图 1-1-13 Y 向 $T_{\max}$ - I 特性