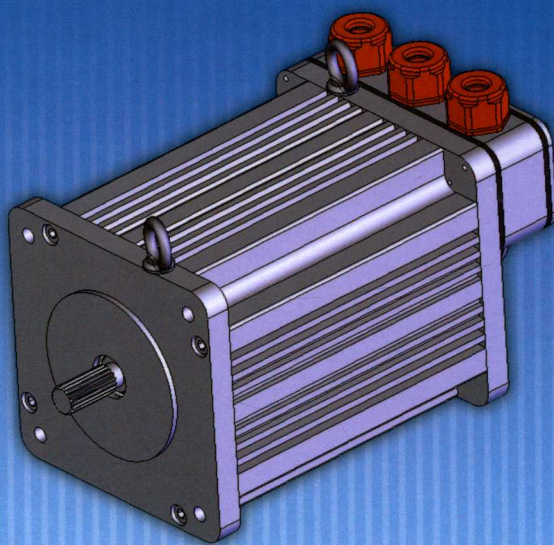


永磁直流无刷电机 实用设计 及应用技术

YONGCI ZHILIU WUSHUA DIANJI
SHIYONG SHEJI
JI YINGYONG JISHU

邱国平 丁旭红 著



上海科学技术出版社

永磁直流无刷电机 实用设计及应用技术

邱国平 丁旭红 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

永磁直流无刷电机实用设计及应用技术 / 邱国平,
丁旭红著. —上海:上海科学技术出版社,2015.6

ISBN 978-7-5478-2547-1

I. ①永… II. ①邱… ②丁… III. ①永磁直流电机
—无刷电机—设计 IV. ①TM345.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 041344 号

永磁直流无刷电机实用设计及应用技术

邱国平 丁旭红 著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路193号 www.ewen.co

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 889×1194 1/16 印张 22 插页 4

字数 660千字

2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-2547-1/TM·54

定价: 98.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

作者简介

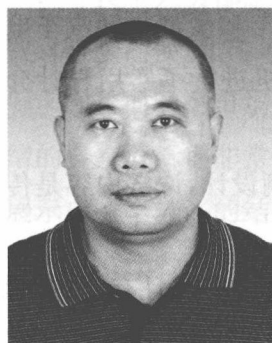
>>>>>>



邱国平,浙江南浔人,1946年生,曾获“江苏省科技先进工作者”称号,全国科学重大科研项目主要负责人,曾获全国科学大会奖。

自1971年起从事光机电仪器及电机设计、制造和理论研究工作,设计过各类直流电机、交流电机、齿轮电机、步进电机、无刷电机、同步电机等。

在国内率先开发了智能点钞机电机、塑封变频空调步进电机、交流磁滞同步电机等,领导参加了具有国际、国内一流水平的一微米校正望远镜、一秒级直角棱镜等设计制造工作,有丰富的理论和实践经验,对电机设计理论有独到见解,并提出了电机的实用设计方法。著有《永磁直流电机实用设计及应用技术》一书。



丁旭红,江苏溧阳人,1967年生,现任常州市旭泉精密电机有限公司总经理。

自1990年起至今,长期从事电机制造、工艺和电机生产机械的设计生产和电机设计的基础理论研究工作。

对电机的实用设计研究有独特的见解和方法,并在步进电机、无刷电机、伺服电机和直流电机的设计中取得了很好的效果;在电机生产和理论设计中拥有12项国家专利。

关于本书



本书是一本阐述永磁无刷电机和永磁同步电机基本知识和理论,电机实用设计,计算机辅助设计的“实战型”电机设计普及书籍。

本书介绍了无刷电机的基本知识,作者站在新的角度介绍了无刷电机内部和外部的特征,阐述了分数槽集中绕组和大节距电机的相关内容,特别是对无刷电机的机械特性、主要常数和目标参数进行了分析,提出了电机分区和基本绕组单元等全新概念,对分数槽集中绕组的排列和霍尔元件的正确安放提出了许多新的方法和观点。

本书主要介绍的是永磁无刷电机和永磁同步电机的实用设计方法,其中包括:电机目标设计法,电机的 K_T 、 K_E 设计法,电机感应电动势法,电机推算法,电机通用公式设计法等,方法简单、可靠、实用、设计符合率好。本书还简单介绍了 Maxwell 的无刷电机设计计算的基本知识。

本书用多种实用设计方法对无刷电机进行计算,并与电机的技术指标和实测性能进行对比分析,用其他设计程序对实例电机进行核算、相互印证,证明实用设计方法的简便、可靠并有相当精度的设计符合率。作者特地介绍广泛应用的电动自行车、电动摩托车、微型电动车和微型电动汽车电机的实用设计,电动车动力性能及其计算。作者还用新的观点对永磁同步电机进行了实用设计介绍,用最简捷的方法就能求出永磁同步电机的主要尺寸参数。

本书介绍了数十种功率从数瓦至数百千瓦的无刷电机和永磁同步电机实例设计,许多内容是传统的电机理论著作中还没有分析过的,反映了作者实际工作的经验和研究成果。

本书力求通俗易懂、知识面广、实用性强,作者引用众多的电机设计实例,图文并茂且有新意,读者通过阅读本书能对永磁无刷直流电机和永磁同步电机的实用设计有一个新的清晰的了解,使无刷电机设计不成为一种深不可测的工作,并能迅速地掌握这门电机设计制造技术。一般具有初高中文化程度的人都能接受和理解,是电机设计技术人员和相关大专院校师生的一本很好的电机设计参考书。

前言

▶▶▶▶▶▶

永磁直流无刷电机是随着电子科学技术和电机控制理论的发展而产生的一种机电一体化控制系统的新型电机,广泛应用于航天、军事、工业自动化控制、机械、船舶、医疗器械、机床加工、办公用品、家用电器、汽车、摩托车、电动自行车等行业。直流无刷电机包括永磁同步电机具有良好的机械特性和伺服性能、很高的效率,正在逐步替代直流、交流、步进等电机。

但是,无刷电机的设计技术跟不上生产的发展需要。许多无刷电机的设计还是沿用了以往永磁直流电机设计的观点和方法:用“磁路”这一观点的程序和方法设计无刷电机,计算量大,且误差也大;用“磁场”方法的2D、3D软件设计计算电机,需要的时间多、花费也多,还需要配备一流的电机设计和软件操作水平。

在实际生产中,很多单位花重金聘请相关单位设计研制所需要的无刷电机或永磁同步电机,虽然经过了较长的研制时间,但最终设计出的电机效果有时仍不能令人十分满意。这使电机生产企业和设计技术人员都感到困惑,他们非常需要一套比较实用的永磁无刷电机设计思路和方法,以便有效、快速、简便、正确地对电机进行设计以适应实际生产的需要。

在目前图书市场上,无刷电机包括永磁同步电机的专著对电机研究得比较精深,把电机千头万绪的要素分析得非常细致;但是,介绍电机设计的实例却较少,许多计算参数都是“预先设置”,才能展示出一个较好的结果;当前有些电机分析理论在实际的无刷电机设计中并不能很好运用。

本书作者从事电机设计工作多年,对永磁无刷电机的设计有了一些经验和体会,在这个过程中,作者用新的视角和观点对永磁无刷电机设计提出了一些系统的电机实用设计的观点、方法、公式及技术。作者在实际的设计工作中摒弃了一些烦琐的设计公式及数学计算,用较实用简捷的方法,有目的地设计出较完满的电机。这些都是作者多年工作经验的积累,并在实际的设计工作中得到了不断验证,虽然部分内容作者在相关的杂志和著作中提出过,但迄今为止没有很好地系统归纳起来。作者认为,这些电机的设计理念和应该为广大电机设计技术人员所共享、接受和掌握,为社会服务;为此,作者把自己的设计思路、观点、方法整理成册,出版成书。

这本书用新的观点阐述永磁无刷电机内部参数和外部特性的关系,使读者容易理解如何通过设计获得内部参数和外部特性,作者所提出的多种简捷的设计方法,能快速、有效地获得设计结果。

集中绕组永磁电机的设计与传统的永磁电机的设计有非常大的区别,由于传统电机的设计沿用感

应电机的设计思想和方法,这与集中绕组电机的设计思想相违背,本书根据当前永磁电机发生的重大变化,对“集中绕组”设计问题进行了翔实的介绍,可以帮助一些设计人员解决这方面的设计困惑。

本书就电动车电机设计有非常详细的介绍,从电动车本体动力性能的计算和电动车电机的实用设计,包括相关的行业标准等内容都有实例提供,是目前相关电动车设计内容较丰富的实用设计书籍。

作者在书中提出了一些新的电机设计理念和方法,如磁链、齿磁通的认识与计算、绕组系数的认识、槽利用率的提出与计算、设计符合率、电机外部特征和内部特征的关系、电机气隙体积、电机定子长度、绕组通电导体数的目标计算、冲片最佳设计等,从而总结出永磁无刷电机的实用设计方法,其中包括:电机目标设计法、电机常数设计法、电机感应电动势法、电机推算法、电机通用公式设计法、电机实用变形法、电机设计转换法、分步实用设计法等。这些系统的实用电机设计的观点、方法、公式及技术,可以摒弃烦琐的设计模式及数学计算,避开电机设计中部分计算参数的计算,简捷而有针对性地求出无刷电机、永磁同步电机模型和主要尺寸参数,简化了电机设计的过程。这些方法能够在较短的时间内,有目的地简捷设计、计算出具有一定精度并符合设计技术要求、机械性能的电机结构和主要尺寸参数的无刷电机和永磁同步电机。本书还简单介绍了 Maxwell 计算机辅助设计的基本操作知识和 Maxwell 分步设计等方法。

作者出版本书是想为大家奉献一本通俗的有理论支撑的实用电机设计书籍,力求做到通俗化、简单化、实用化;因此本书没有用过多的篇幅介绍和阐述电机基础理论,尽量多介绍一些实用的电机设计新理念和经验与大家探讨。

作者在书中所列举的大量实例,大多是作者经历的电机设计内容,部分是由友人提供的,所有实例都是真实可信的;个别引用了其他电机设计书上的内容也注明了出处。书中的许多设计理念和实用设计方法是传统的国内外电机设计理论著作中没有分析过的,反映了作者实际工作的经验和研究成果。

本书只是作者对永磁无刷电机设计某些经历的主观认识的阐述,难免有许多局限、错漏和不当之处,敬请读者和同行批评、指正。如果读者看了本书,能用作者介绍的理论、经验、方法去分析和设计无刷电机和永磁同步电机,作者就觉得无限宽慰了。

作者写这本书乃至出版,得到了上海科学技术出版社和许多同行、厂家的大力支持,在此深表感谢。常州亚美柯宝马电机有限公司、常州市旭泉精密电机有限公司、常州市创谊电机电器有限公司、无锡德信微特电机有限公司、常州市运控电子有限公司等对作者写这本书给予了极大的鼓励和支持,为此作者表示诚挚的感谢。

本书主要由邱国平和丁旭红著述,王秋平、王增元、许建国、姚欣良、丁立、顾丰乐、吴震、邱明参加了全书的编写工作,参加本书部分章节编写者在相关章节表明。作者在本书著作过程中得到哈尔滨工业大学李铁才教授、东南大学余海涛教授、上海交通大学姜淑忠教授和王孝伟博士、杨锬总工程师的指导和帮助。本书由李铁才教授、丁泉军总经理、王增元总经理、孙明庆总工程师分别进行了审核。感谢江思敏博士、谭洪涛高级工程师的帮助。全书文图由阿甘整理和审阅。

目录

- 第1章 永磁直流无刷电机简介 / 1
 - 1.1 永磁直流无刷电机概述 / 1
 - 1.2 无刷电机和永磁直流有刷电机的区别 / 2
 - 1.3 无刷电机输入、输出功率的计算 / 2
 - 1.4 无刷电机结构、工作原理和工作模式 / 3
 - 1.5 无刷电机的电磁转矩和感应电动势 / 3
 - 1.6 无刷电机的标准和技术指标的确定 / 4
 - 1.7 无刷电机的其他相关技术指标 / 5
 - 1.7.1 无刷电机的负载 / 5
 - 1.7.2 无刷电机的电路 / 5
 - 1.7.3 无刷电机的磁路 / 5
 - 1.7.4 无刷电机的通电形式 / 6
 - 1.7.5 无刷电机的换向 / 8
 - 1.7.6 无刷电机的位置传感器 / 8
 - 1.8 方波无刷电机的控制器 / 9
- 第2章 无刷电机的机械特性、主要常数和外部特征 / 10
 - 2.1 无刷电机的机械特性与机械特性曲线 / 10
 - 2.2 无刷电机三大重要常数 K_T 、 K_E 、 K_n / 12
 - 2.2.1 无刷电机的转矩常数 K_T / 12
 - 2.2.2 无刷电机的反电动势常数 K_E / 12
 - 2.2.3 无刷电机的转速常数 K_n / 13
 - 2.2.4 电机的转速 n / 14
 - 2.2.5 无刷电机的感应电动势 E / 15
 - 2.3 电机 $T-n$ 曲线与电机各参数关系 / 15
 - 2.3.1 $T-n$ 曲线与磁链 $N\Phi$ 和内阻 R 的关系 / 15
 - 2.3.2 $T-n$ 曲线与工作电压 U 的关系 / 15
 - 2.4 无刷电机的调节特性 / 16
 - 2.4.1 无刷电机的电压调节特性 / 16
 - 2.4.2 无刷电机的电阻调节特性 / 17
 - 2.4.3 无刷电机的脉宽调制调速方法 / 17
 - 2.5 电机特性曲线分析 / 19
 - 2.5.1 电机的转矩常数 K_T 对 $T-n$ 曲线的作用 / 19
 - 2.5.2 电机 $T-n$ 曲线的非线性分析 / 19
 - 2.5.3 负载点的理想机械特性曲线 / 19
 - 2.5.4 电机的转矩常数 K_T 与 $T-I$ 曲线的关系 / 19
 - 2.5.5 电机的 $T-\eta$ 曲线 / 20
 - 2.5.6 电机的 $T-P_2$ 曲线 / 21
 - 2.5.7 电机机械特性曲线重要点的分析与调整 / 21
 - 2.6 电机的效率平台 / 25
 - 2.7 无刷电机的电磁功率与损耗 / 25
 - 2.8 无刷电机的输入要素 U 、 I 和输出要素 T 、 n / 26
 - 2.8.1 无刷电机的输入要素 U 、 I / 26
 - 2.8.2 无刷电机的输出要素 T 、 n / 27
 - 2.8.3 无刷电机输入要素和输出要素之间的关系 / 27
- 第3章 无刷电机的绕组、磁路和内部特征 / 28
 - 3.1 无刷电机的绕组 / 28
 - 3.1.1 无刷电机的集中绕组 / 28
 - 3.1.2 无刷电机的大节距绕组 / 28
 - 3.1.3 无刷电机三相绕组星形和三角形接法 / 29
 - 3.1.4 并联支路数 a 和导线并联股数 a' / 29
 - 3.1.5 无刷电机的绕组系数 K_{dp} / 30
 - 3.1.6 无刷电机的有效通电导体根数 N / 30
 - 3.1.7 无刷电机的绕组的矩形波和正弦波 / 30
 - 3.2 无刷电机磁路结构介绍 / 31

- 3.2.1 无刷电机的磁通 / 31
 - 3.2.2 无刷电机的工作磁通 / 31
 - 3.2.3 磁钢磁通和磁通密度的概念 / 32
 - 3.2.4 气隙磁通和磁通密度的分析 / 34
 - 3.2.5 齿磁通和齿磁通密度的分析 / 35
 - 3.2.6 气隙槽宽与气隙齿宽比的设定 / 36
 - 3.2.7 磁钢剩磁 B_r 和齿磁通密度 B_z 的关系 / 36
 - 3.2.8 磁钢和气隙磁通分布的测定 / 37
 - 3.2.9 电机的齿磁通密度变化的分析 / 38
 - 3.2.10 无刷电机的齿磁通和齿磁通密度的计算 / 38
 - 3.2.11 求取电机齿磁通密度的公式和验证 / 38
 - 3.2.12 无刷电机齿磁通密度和齿相当工作磁通密度 / 41
 - 3.2.13 无刷电机定子齿磁通密度的小结 / 42
 - 3.2.14 无刷电机工作磁通的计算单位 / 42
 - 3.3 无刷电机磁路的磁通计算 / 43
 - 3.3.1 无刷电机磁路中的最大磁通 / 43
 - 3.3.2 无刷电机齿饱和磁通密度 / 44
 - 3.4 无刷电机的磁钢 / 44
 - 3.5 无刷电机的冲片 / 45
 - 3.5.1 冲片的气隙圆周齿宽和气隙圆周槽宽 / 45
 - 3.5.2 定子的深槽冲片 / 45
 - 3.5.3 定子的槽满率和槽利用率 / 46
 - 3.6 电流密度、线负荷和发热因子 / 47
- 第4章 分数槽集中绕组和大节距绕组 / 49**
- 4.1 分数槽集中绕组无刷电机 / 49
 - 4.2 分数槽集中绕组分区 / 51
 - 4.2.1 分区与电机的关系 / 51
 - 4.2.2 分区和单元电机的区别 / 51
 - 4.2.3 电机机械夹角和电夹角的关系 / 51
 - 4.2.4 电机分区电夹角和机械夹角的关系 / 52
 - 4.2.5 分区相线圈、分区齿、槽和磁钢的关系 / 53
 - 4.2.6 分数槽集中绕组电机各种关系的计算 / 56
 - 4.2.7 分区中一相线圈个数不是整数的分析 / 57
 - 4.2.8 分区中各个相关元素的计算表 / 58
 - 4.2.9 力偶电机与非力偶电机 / 59
 - 4.3 绕组展开图的简图画法 / 61
 - 4.3.1 已知无刷电机定子槽数和磁钢片数的画法 / 61
 - 4.3.2 绕组展开图用简图的画法步骤 / 62
 - 4.3.3 每槽电夹角不同时的排列简图 / 63
 - 4.3.4 多相分数槽集中绕组展开图画法步骤 / 64
 - 4.3.5 分数槽集中绕组分布简图举例 / 64
 - 4.3.6 电动自行车电机分数槽集中绕组的数据介绍 / 65
 - 4.4 霍尔元件的位置排放 / 65
 - 4.4.1 电机线圈的同相位点 / 65
 - 4.4.2 分数槽集中绕组无刷电机线圈换向 / 65
 - 4.4.3 霍尔元件的放置位置与相线圈换向边的关系 / 67
 - 4.4.4 霍尔元件的分布和摆放 / 67
 - 4.4.5 霍尔元件分布摆放例证 / 68
 - 4.4.6 霍尔元件放置方法的小结 / 69
 - 4.4.7 特殊的分数槽集中绕组的霍尔元件排布法 / 69
 - 4.4.8 绕组实用排列法画相关书籍中的霍尔元件排布 / 71
 - 4.4.9 通电线圈在电机磁场中的换向 / 72
 - 4.4.10 霍尔元件放在齿上和槽内的问题 / 73
 - 4.5 无刷电机的正反转 / 74
 - 4.5.1 电机正反转的概念 / 74
 - 4.5.2 无刷电机反转的几种方法 / 75
 - 4.6 大节距绕组无刷电机 / 76
 - 4.6.1 大节距绕组形式和判别 / 76
 - 4.6.2 大节距绕组机械夹角与电夹角的关系 / 77
 - 4.7 整数槽大节距绕组的形式 / 77
 - 4.8 分数槽大节距绕组的形式 / 78
 - 4.9 大节距绕组的画法 / 80
 - 4.9.1 大节距定子绕组和转子极数的关系 / 80
 - 4.9.2 三相大节距绕组单元分区的计算 / 80
 - 4.9.3 三相大节距绕组展开图的画法步骤 / 80
 - 4.10 霍尔元件与大节距绕组 / 82
 - 4.10.1 霍尔元件的放置位置与相线圈换向边的关系 / 82

- 4.10.2 带有霍尔元件的独立转子位置传感器 / 82
- 第5章 无刷电机的实用设计方法 / 84**
- 5.1 电机设计方法和程序的探讨 / 84
- 5.2 无刷电机设计基本思路的探讨 / 85
- 5.3 无刷电机的实用设计法 / 85
- 5.3.1 无刷电机实用设计方法简介 / 85
- 5.3.2 电机设计计算精度和设计符合率 / 85
- 5.4 无刷电机的目标设计法 / 86
- 5.4.1 电机设计的基本思想 / 86
- 5.4.2 目标设计法中的主要目标参数 / 86
- 5.4.3 目标设计的设计计算精度和设计符合率分析 / 89
- 5.4.4 无刷电机气隙体积的目标设计 / 89
- 5.4.5 无刷电机绕组匝数的目标设计 / 92
- 5.4.6 无刷电机定子冲片的目标设计 / 93
- 5.4.7 无刷电机定子冲片的最佳设计 / 94
- 5.4.8 无刷电机目标设计计算例 / 95
- 5.5 无刷电机 K_T 目标设计法 / 97
- 5.5.1 用最大效率点法求电机转矩常数 K_T / 101
- 5.5.2 电机改制的 K_T 设计法 / 104
- 5.6 无刷电机 K_E 目标设计法 / 108
- 5.6.1 反电动势常数 K_E 的分析 / 109
- 5.6.2 反电动势常数 K_E 目标设计法设计实例 / 110
- 5.6.3 对 K_E 目标设计法的评价 / 113
- 5.7 无刷电机的测试发电机法 / 113
- 5.7.1 测试发电机的概念 / 114
- 5.7.2 测试发电机测量感应电动势的形式和方法 / 115
- 5.7.3 求取电机有效系数 α_1 的方法 / 116
- 5.7.4 测试发电机的感应电动势 / 118
- 5.7.5 电机工作磁通的分析 / 118
- 5.7.6 从 Maxwell 中求感应电动势常数 / 119
- 5.7.7 从 Maxwell 中用感应电动势求电机的齿磁通密度 / 121
- 5.7.8 感应电动势波形的分析 / 122
- 5.7.9 用电机通用公式法验证测试发电机法的准确性 / 124
- 5.7.10 测试发电机法的分析 / 124
- 5.8 无刷电机目标推算法 / 124
- 5.8.1 冲片相同的目标推算法 / 125
- 5.8.2 异形冲片无刷电机的目标推算法 / 127
- 5.8.3 比较复杂的电机目标推算法 / 129
- 5.8.4 全新电机设计的目标推算法 / 134
- 5.8.5 目标推算法的小结 / 135
- 5.9 无刷电机通用公式法 / 135
- 5.9.1 电机通用公式法实用设计举例一 / 136
- 5.9.2 电机通用公式法实用设计举例二 / 137
- 5.10 无刷电机分步目标设计法 / 138
- 5.11 无刷电机设计的实验修正法 / 139
- 5.11.1 K_T 常数测试法 / 139
- 5.11.2 电压调整法 / 139
- 第6章 Maxwell 在无刷电机设计中的基本操作 / 141**
- 6.1 Maxwell 软件的介绍 / 141
- 6.2 RMxpert 在永磁直流无刷电机中的应用 / 141
- 6.2.1 无刷电机工程模型的引入 / 142
- 6.2.2 无刷电机参数的设定 / 142
- 6.2.3 无刷电机参数的输入 / 143
- 6.2.4 无刷电机参数的计算 / 147
- 6.2.5 无刷电机计算结果的查看 / 147
- 6.3 RMxpert 导入至 Maxwell 2D 有限元模块 / 162
- 6.4 Maxwell 电机参数的解读 / 165
- 6.5 目标设计与 Maxwell / 167
- 第7章 无刷电机的实用设计 / 168**
- 7.1 驱动无刷电机设计 / 168
- 7.1.1 57ZWX 无刷电机技术数据 / 168
- 7.1.2 57ZWX 无刷电机数据分析 / 169
- 7.1.3 电机的冲片分析 / 169
- 7.1.4 电机铁心长度的推算 / 170
- 7.1.5 73-60W-6-8J 无刷电机实用设计计算 / 171
- 7.2 大功率无刷电机设计 / 172
- 7.2.1 电机技术数据 / 172
- 7.2.2 用 K_T 法进行设计 / 172
- 7.2.3 用 Maxwell 进行核算 / 173
- 7.3 异形大功率无刷电机设计 / 174
- 7.3.1 相同结构等比例电机之间的参数关系 / 174
- 7.3.2 相同结构等比例电机的设计思路 / 176

- 7.3.3 异形大功率无刷电机设计举例 / 177
 - 7.4 齿轮减速无刷电机设计 / 181
 - 7.4.1 电机技术数据 / 181
 - 7.4.2 齿轮减速无刷电机的技术分析 / 182
 - 7.4.3 齿轮减速无刷电机实用计算 / 182
 - 7.4.4 齿轮减速无刷电机测试报告 / 183
 - 7.5 交流供电无刷电机设计 / 184
 - 7.5.1 交流整流电源的整流分析 / 184
 - 7.5.2 家用空调风扇无刷电机的设计 / 185
 - 7.6 直驱无刷电机(DDR)设计 / 189
 - 7.6.1 直驱无刷电机的特点 / 189
 - 7.6.2 直驱无刷电机的设计计算 / 190
 - 7.6.3 用 Maxwell 计算 / 194
 - 7.6.4 设计符合率的验证 / 197
 - 7.7 无刷电机实用变形设计法 / 198
 - 7.7.1 实用变形设计法的设计思路 / 199
 - 7.7.2 实用变形设计法的设计举例 / 199
 - 7.7.3 实用变形设计法的冲片设计 / 202
 - 7.7.4 实用变形设计法的设计小结 / 202
 - 7.8 无刷电机的 Maxwell 分步目标设计 / 202
- 第8章 电动车无刷电机实用设计 / 207**
- 8.1 电动车的动力性能 / 207
 - 8.1.1 在平路上匀速运行时的车况 / 207
 - 8.1.2 在斜坡上匀速运行时的车况 / 208
 - 8.1.3 电动车的动力加速性能 / 209
 - 8.1.4 电动车的恒功率性能 / 210
 - 8.1.5 电动车工作点的选取 / 213
 - 8.1.6 电动车最大功率的实用计算 / 214
 - 8.2 电动车电机机械性能的求取 / 216
 - 8.3 电动自行车无刷电机实用设计 / 218
 - 8.3.1 电动自行车无刷电机概述 / 218
 - 8.3.2 电动自行车轮毂电机的设计 / 222
 - 8.3.3 行星式过桥齿轮减速轮毂电机的设计 / 228
 - 8.3.4 一种新型的齿轮减速电机的设计 / 233
 - 8.4 电动摩托车电机实用设计 / 238
 - 8.4.1 电动摩托车电机概述 / 238
 - 8.4.2 轻便高端配置电动摩托车电机的设计 / 241
 - 8.4.3 通用电动摩托车电机的设计 / 245
 - 8.4.4 无刷电机内转子和外转子的转换推算算法 / 253
 - 8.5 特种车辆电动车无刷电机实用设计 / 256
 - 8.5.1 特种车辆电动车电机概述 / 256
 - 8.5.2 高尔夫球车电机的设计 / 259
 - 8.6 电动汽车电机实用设计 / 263
 - 8.6.1 电动汽车无刷电机的设计 / 263
 - 8.6.2 电动汽车驱动电机选型匹配 / 266
 - 8.6.3 轻型电动汽车电机的设计 / 270
- 第9章 永磁同步电机实用设计 / 274**
- 9.1 永磁同步电机概述 / 275
 - 9.2 永磁同步电机实用设计方法 / 284
 - 9.2.1 永磁同步电机的“相当无刷电机”设计法 / 284
 - 9.2.2 永磁同步电机的测试发电机法 / 290
 - 9.3 永磁同步电机实用设计举例 / 291
 - 9.3.1 交流伺服电机实用设计一 / 291
 - 9.3.2 交流伺服电机实用设计二 / 298
 - 9.3.3 微型电动车永磁同步电机实用设计 / 300
 - 9.3.4 微型电动汽车永磁同步电机实用设计 / 303
 - 9.3.5 大功率永磁同步电机设计分析 / 307
 - 9.3.6 测试发电机法的实用设计 / 311
 - 9.3.7 系列永磁同步电机的实用设计法 / 316
 - 9.3.8 永磁同步电机的实用设计变换法 / 317
 - 9.3.9 永磁同步电机冲片实用变换法 / 319
 - 9.3.10 永磁同步电机多目标实用设计法 / 321
 - 9.4 永磁同步电机调整与改进 / 332
 - 9.5 永磁同步电机的分步目标设计 / 335
 - 9.6 永磁同步电机的 Maxwell 分步目标设计 / 338
 - 9.7 永磁同步电机实用设计小结 / 340
- 参考文献 / 342**

第 1 章 永磁直流无刷电机简介

>>>>>

1.1 永磁直流无刷电机概述

电机作为机电能量的转换装置,应用范围已遍及国民经济的各个领域以及人们的日常生活。永磁直流有刷电机有许多优点,但最大的缺点是电刷容易磨损,运行寿命远远不如无刷交流电机、交流同步电机等。针对传统直流有刷电机的弊病,早在 20 世纪 30 年代就有人开始研制以电子换向代替电刷机械换向的永磁直流电机。70 年代以来,随着电力电子工业的飞速发展,许多高性能半导体功率器件相继出现和高性能永磁材料的问世,均为永磁直流无刷电机(以下简称“无刷电机”)的广泛应用奠定了坚实的基础。无刷电机有交流异步电机、步进电机和直流有刷电机等不具备的优点,一般适合用永磁直流有刷电机的场合,基本上都可以用无刷电机所替代。

无刷电机主要有以下优点:

(1) 具有很好的机械特性和调节特性,可以替代直流有刷电机调速、变频电机调速、异步电机加减速器调速。

(2) 可以低速大功率运行,省去减速器,直接驱动大的负载。

(3) 具有传统直流有刷电机的所有优点,同时又取消了电刷、集电环结构。

(4) 转矩特性优异,中、低速转矩性能好,启动转矩大,启动电流小。

(5) 无级调速,调速范围广,过载能力强。

(6) 体积小、质量轻、出力大。

(7) 软启软停、制动特性好,可省去原有的机械制动或电磁制动装置。

(8) 电机本身没有励磁损耗和电刷损耗,效率高,综合节电效果好。

(9) 可靠性高、稳定性好、适应性强、维修与保养简单。

(10) 耐颠簸震动、噪声低、震动小、运转平滑、寿命长。

(11) 不产生火花,特别适合公共场所,抗干扰,安全性能好。

无刷电机广泛应用于国防军事、航天、办公机械、计算机、音响、通风行业、家用空调、自动控制、仪器仪表、汽车等领域,在计算机中光盘驱动器、硬盘等大量使用了非常精密、形式不一的无刷电机。

目前电动自行车、电动摩托车、微型电动汽车的电机,绝大多数采用了无刷电机。电动自行车用无刷电机,全国每年产量达数千万台,也有年产达数百万台的电动自行车电机厂家。现在观光车、游览车、叉车、电动汽车中也逐步应用无刷电机,电动车用无刷电机是使用最广泛、产量最高的一类无刷电机。

无刷电机越来越受到重视,它不但能代替一般的永磁直流有刷电机使用,而且在数控机床、加工中心、智能机器人等要求高精度的应用场合得到广泛使用。无刷电机在较大的转速范围内可以获得较高的效率,更适合家电变频调速的需要,在空调、冰箱、洗衣机等产品中,逐步由常规的单相异步电机转向无刷电机变频调速。因此无刷电机具有广阔的发展前景。

随着控制器的小型化、模块化,以前做得较大的控制器现在可以做得更小,有的可以和电机做在一起,使无刷电机使用起来非常方便。研究、开发、生产无刷电机是一种新的趋势,这方面的论著也比以往多了起来。

图 1-1 所示是常用的无刷电机的外形图,这几种电机在无刷电机生产中占有很大的比例,形成了不同的无刷电机产业。

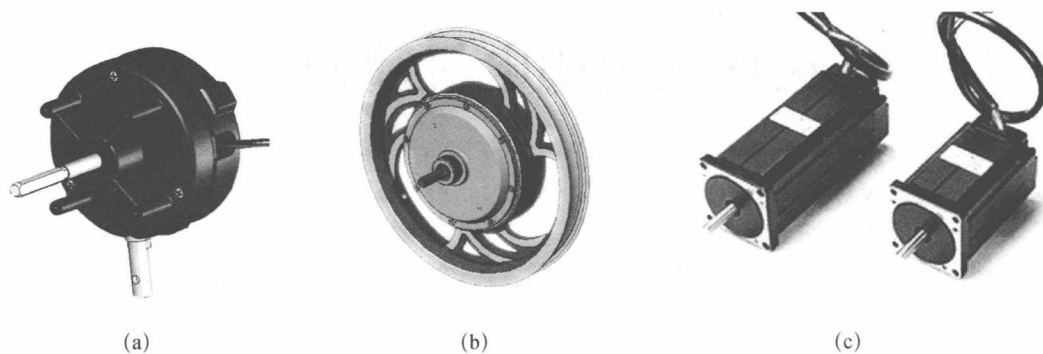


图 1-1 不同形式的无刷电机

(a) 无刷风扇电机; (b) 无刷电动自行车电机; (c) 驱动无刷电机

1.2 无刷电机和永磁直流有刷电机的区别

可以这样理解无刷电机:无刷电机是用电子换向的方法替代永磁直流有刷电机中机械换向器的一种电机,无刷电机的机械性能和永磁直流有刷电机的机械性能非常相似。

表 1-1 列出了永磁直流有刷电机和无刷电机的基本性能比较。

从表 1-1 可以看出:无刷电机在功率密度、峰值效率、转速范围、可靠性、运行寿命、结构坚固性方面都比直流有刷电机强,仅控制器成本上高于永磁直流有刷电机,无刷电机在性能和其他方面比永磁直流有刷电机具有更强大的优势。随着电子控制技术的迅速发展和普及,控制器的成本会更低,体积会更小,功率密度会更大,相信无刷电机在更多的场合会取代永磁直流有刷电机。

表 1-1 驱动电机的基本性能比较

项 目	永磁直流有刷电机	无刷电机
功率密度	低	高
峰值效率(%)	85~89	95~97
负载效率(%)	80~87	85~97
转速范围(r/min)	1 000~10 000 以上	500~10 000 以上
可靠性	一般	优秀
运行寿命	短	长
结构坚固性	差	一般
电机外形尺寸	大	小
控制操作性能	好	好
控制器成本	低	高

1.3 无刷电机输入、输出功率的计算

无刷电机输入的是电能,以每小时输入的功即功率来表示,称输入功率,用 P_1 表示。

$$P_1 = UI \quad (1-1)$$

式中 P_1 ——输入功率(W);
 U ——额定电压(V);
 I ——输入电流(A)。

无刷电机的输出功率按下式计算。

$$P_2(\text{W}) = F(\text{N}) \cdot r(\text{m}) \cdot \omega \left(\frac{\text{arc}}{\text{s}} \right)$$

$$\begin{aligned} &= T(\text{N} \cdot \text{m}) \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \times n \right) \left(\frac{\text{r}}{\text{min}} \right) \\ &= \frac{Tn}{9.5493} (\text{W}) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 P_2 ——输出功率(W);
 n ——额定转速(r/min);
 T ——额定转矩(N·m)。

无刷电机的效率则为

$$\eta = (P_2/P_1) \times 100\% \quad (1-3)$$

1.4 无刷电机结构、工作原理和工作模式

1) 无刷电机结构 无刷电机的品种非常多,结构各不相同,它归根结底由转子、定子及电机控制部分组成了无刷电机系统,其中转子由永磁体等组成,定子由线圈绕组和铁心组成,电机控制部分由换相和检相元件以及无刷电机控制器组成。转子分为外转子和内转子,转子上有多极块形磁钢或环形磁钢,

定子极上有绕组,在定子上特定位置处安放位置检测元件和控制器相互配合,控制电机的正常换相,现在大多数用的是霍尔元件,也有其他方法控制换相。不考虑电子换向部分的话,无刷电机的结构是非常简单的,完全可以和交流同步电机相比。图 1-2 所示是无刷电机内转子结构。

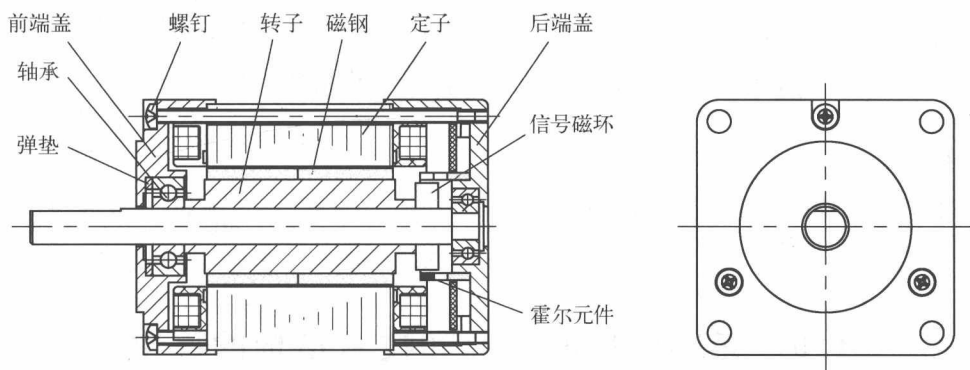


图 1-2 无刷电机内转子结构

2) 无刷电机工作原理 无刷电机是在永磁直流有刷电机的基础上发展出来的,随着电子控制技术的发展和,无刷电机电源波形从方波输入,发展到正弦波输入和同步控制,形成同步运行无刷电机,又称同步电机。现在仍把单一方波(梯形波)电源输入,不涉及同步控制技术的电机称为无刷电机。

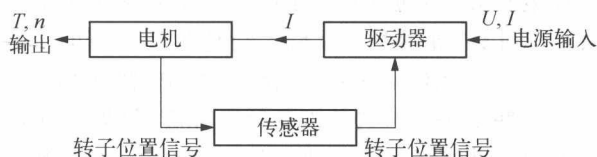


图 1-3 无刷电机工作原理

无刷电机比永磁直流有刷电机复杂,因为电子换向技术改变了电机的结构形式,把通电的线圈固定不动,并产生一个可以旋转的磁场,使磁钢转动,控制信号跟随转子转动的情况而相应变化。

3) 无刷电机工作模式 方波(梯形波)的无刷电机具有普通有刷电机的特性,工作模式是典型的无刷电机模式,这样可以把无刷电机的研究简化到基本的无刷电机模式中去,对方波(梯形波)的无刷电机研究透了,那么研究斩波(PWM)的无刷电机和正弦波的无刷电机就觉得容易理解了。

无刷电机是一个机电一体化的产品,由电机、传感器、驱动器构成,位置传感器检测转子的磁极信号,控制器对比此信号进行逻辑处理,并产生相应的开关信号,开关信号以一定的顺序触发驱动器中的功率开关器件,将电源电流以一定的逻辑关系分配给电机的各相绕组,使电机旋转并产生连续的转矩,图 1-3 所示是无刷电机工作原理。

本书主要介绍三相绕组星形接法的无刷电机,如果对三相绕组星形接法的无刷电机有了非常深刻的了解,再分析无刷电机三角形接法和多相无刷电机,那么也就非常容易理解了。

1.5 无刷电机的电磁转矩和感应电动势

1) 电磁转矩 无刷电机中的通电导体在磁场中受力产生电磁转矩,单根导体的电磁转矩为

$$T' = Fr = Bli_a r = Bli_a \frac{D_a}{2} \quad (1-4)$$

式中 F ——作用在导体上的电磁力(N);
 B ——磁场中的磁通密度(T);
 i_a ——导体中的电流(A);
 l ——导体在磁场中的长度(m);
 D_a ——无刷电机磁钢的表面直径(m)。

无刷电机的电磁转矩为无刷电机的通电线圈 N 根导体所产生的转矩总和。 B 用平均磁通密度 B_{av} 代替,再乘以有效线圈 N 根导体而得电磁转矩为

$$\begin{aligned} T' &= B_{av} l i_a D_a N / 2 \\ &= \frac{B_{av} \pi D_a l N i_a P}{2P\pi} = \frac{\phi N i_a P}{\pi} = \frac{\phi N I P}{\pi a} \\ &= \frac{\phi N I \times 2P}{2\pi a} = \frac{(\phi \times 2P) N I}{2\pi a} \\ &= \frac{1}{a} \frac{\Phi N I}{2\pi} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 ϕ ——电机每极与线圈交链的有效工作磁通,
 $\phi = B_{av} \pi D_a l / 2P$;

Φ ——电机磁钢与线圈交链的工作总磁通,
 $\Phi = \phi \times 2P$;

i_a ——电机线圈电流,无刷电机星形接法时,
 $i_a = I/a$;

a ——电机线圈并联支路数(不是并联支路对数);

P ——电机定子磁极对数。

2) 感应电动势 无刷电机磁钢旋转,电机线圈切割磁力线就会产生感应电动势,根据电磁感应定律,电枢绕组中一根导体的感应电动势可以用 $e = Blv$ 来表示,把电枢每条支路的所有导体的总电动势 E 求出, B 用 B_{av} 代替,磁钢的极距为 τ , $\nu = 2p\tau n/60$,如果每极的磁通 ϕ 已知, $B_{av} = \phi/l\tau$,则电动势 E 由下式决定。

$$\begin{aligned} E &= B_{av} l \nu \frac{N}{a} = \frac{\phi}{l\tau} l \nu \frac{N}{a} \\ &= \frac{Np}{60a} \phi n = \frac{1}{a} \frac{N\Phi n}{60} \end{aligned} \quad (1-6)$$

1.6 无刷电机的标准和技术指标的确定

无刷电机有基本标准 GB/T 21418—2008《永磁无刷电动机系统通用技术条件》。该标准规定了永磁无刷电机及构成系统的永磁无刷电机、驱动器的术语和定义,运行条件,基本要求,试验方法和验收标准等。

一些专业的无刷电机有行业标准,例如电动自行车电机就有了行业标准 QB/T 2946—2008《电动自行车用电动机及控制器》。国家有军用无刷电机的标准 GJB 1863—1994《无刷直流电动机通用规范》。一些厂家自己制定了企业无刷电机的标准,有些厂家参照其他标准在生产无刷电机,如 GB/T 5171.1—2014《小功率电动机 第1部分:通用技术条件》。有些无刷电机又属于伺服无刷电机,对于伺服无刷电机国家又有一些标准。专业无刷电机如汽车无刷电机又有汽车无刷电机的标准。标准不同,对无刷电机的有些要求也不同。

无刷电机使用的电压等级可以参照表 1-2 给出的通用电压。

表 1-2 无刷电机电源工作频率和电压等级表

频率(Hz)	电压(V)
直流	1.5, 3, 5, 6, 9, 12, 24, 27, 36, 40, 48, 60, 110, 220, 270, 310, 400, 480, 500, 610, 700
单相 50, 60, 400	12, 24, 36, 115, 220
三相 50, 60, 400	36, 60, 200, 220, 380

常用的电源电压(V)有:6、9、12、24、36、48、60、72、110、220、380。

现在由于锂电池和镍氢、镍镉电池的出现,电池会有各种不同的电压,所以无刷电机的国家电压标准应该随电池的发展而增加一些标准电压等级。

在设计无刷电机时,选用电源电压既要适合使用要求,又尽量采用标准电压。电源电流的要求与电源的供电情况有关,如果是用交流电整流提供的直流电源给无刷电机使用,一般要求电源的纹波系数要小,电源的内阻要小。

小型无刷电机现在有一种趋势,机座号向步进电机机座号靠拢并与伺服电机统一起来,这样无刷电机的外形尺寸、安装孔尺寸都能得到统一,如:

机座号	20、24、28、36、42、57、86、110、130
无刷电机外径(mm)	20、24、28、36、42、57、86、110、130

无刷电机机座号的制定有与国际接轨的问题,机座号及外径选得合理,既可以适合我国生产及应用,又可以替代国外无刷电机,从而进行国产化。尽量减少进口,发展民族工业,并使产品走向国门,因此认真选择机座号是必要的。

产品的铭牌中标示的技术参数仅是无刷电机

主要的性能,特别是无刷电机额定点的性能,即无刷电机满足外界的需要,正常工作所能达到的性能。

无刷电机的输出功率是通过电机的输出转矩和输出转速来输出的。无刷电机在确定额定输出功率时必须确定额定转矩和额定转速。确定无刷电机输入功率必须确定电机的额定电压和额定电流。为了表征该无刷电机的能量转换能力,必须对电机的效率提出一定的要求,同样输出功率,电机的效率越高,输入功率可以越小。这样无刷电机的体积就可以设计得比较合理。电机的空载转速有时也被设计

者作为考核项目,这是设计的需要。因此无刷电机主要技术指标一般为:额定电压 U_N (V),额定转矩 T_N (N·m),额定电流 I_N (A),额定转速 n_N (r/min),空载转速 n_0 (r/min),空载电流 I_0 (A)。

以此可以算出如下三项电机的重要参数:

$$\begin{aligned} P_1 &= U_N I_N (\text{W}) \\ P_2 &= n T_N / 9.5493 (\text{W}) \\ \eta &= (P_2 / P_1) \times 100\% \end{aligned}$$

以上这些可以作为无刷电机的主要性能和技术指标,用以判断无刷电机的好坏。

1.7 无刷电机的其他相关技术指标

1.7.1 无刷电机的负载

无刷电机对外界做功,一般常有三种形式:

① 重物提升做功;② 对重物牵引做功;③ 对重物旋转做功。

无刷电机的负载存在选取和计算的问题,作者在《永磁直流电机实用设计及应用技术》的第3章做了一些基本介绍,读者可以参看,这里不多做介绍。作者会在本书的其他章节阐述一些车用无刷电机负载和动力性能的介绍和计算,里面会涉及无刷电机的负载选用和计算。

1.7.2 无刷电机的电路

可以把无刷电机看作电路和磁路两部分。电机的电路是电流通过电机形成的回路。在这个回路中,必须要有电源供电和接受供电的无刷电机。无刷电机通电后,回路中形成电流 I ,电机运转起来,如果电机的出轴受到一个力的作用,那么电机轴会产生一个相应的转矩和转速,并产生一个感应电动势 E 。如果是简化的无刷电机,不考虑电机绕组的电感,不考虑驱动控制器的影响,那么电机电路的简化电路如图1-4所示。

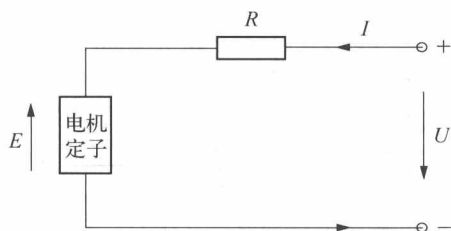


图 1-4 无刷电机电路的简化电路

电机的电压平衡方程为

$$U = E + IR \quad (1-7)$$

式中 U ——电机供电电压;

I ——电源输入电流,在无刷电机为三相星形绕组时,也是无刷电机通电线圈的导通电流;

R ——电机的内阻;

E ——电机以某一速度 n (r/min) 转动时产生的反电动势。

也就是说,直流供电电压 U 等于电机转动所产生的反电动势和电机内阻的压降之和。这样无刷电机的机械特性曲线理论上应该和永磁直流有刷电机是一样的。

1.7.3 无刷电机的磁路

无刷电机转子磁钢的磁力线都是经过电机气隙再通过电机定子齿的。线圈绕在通过磁力线的齿上与磁力线交链。电机的磁路和电机的电路形式相同,遵循磁路欧姆定律,无刷电机的磁路比有刷电机的磁路要复杂。

无刷电机的磁路计算在无刷电机的设计和计算中是一项重要工作。在磁路中,电机磁钢产生的磁通和气隙磁通、齿磁通、轭磁通是不一样的。这样给电机设计计算带来了麻烦。要精确计算无刷电机各段磁路上的磁场状况是比较复杂的,以往的计算都是把电机的磁场用“路”的方法简化,使得电机设计、计算比较简单。现在计算机功能非常强大,借用计算机对无刷电机从磁场的角度进行计算,可以用有限元等数值的分析方法进行计算(图1-5)。

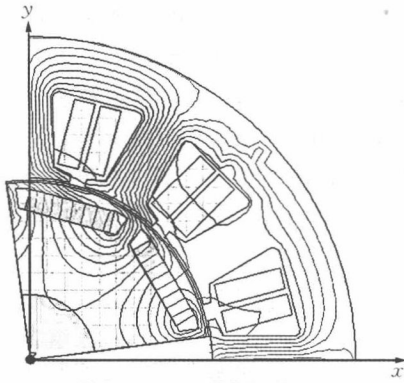


图 1-5 无刷电机的磁路

1.7.4 无刷电机的通电形式

从电磁原理看,无刷电机由一个多极永磁磁钢的转子和由相对极数线圈的定子组成,定子线圈如果能够产生一个单向的旋转磁场(不是脉振磁场),转子因该磁场的磁极作用而跟转,这样电机就可以转动起来,如果转子上加有负载,为了使转子能够与磁场同步转动,电源必须供给电机定子更大的

电流,从而产生相应的磁场,电机就能做功。

无刷电机定子要产生一个旋转磁场,要满足以下两个条件:

(1) 定子必须有产生均匀旋转磁场的线圈。

(2) 把直流电转换成按一定的规律分配给定子相应线圈电能的电源分配装置。

因此无刷电机必定由电机和驱动器这两部分组成。无刷电机的驱动线路各式各样,最简单的是用现有的集成块加上功率放大部分。图 1-6 所示是 MC33035 无刷电机集成块及功放部分和无刷电机部分的连接总图。从图上虚线框的无刷电机看:电机一般应该有八根引出线,不管是星形接法或三角形接法,电机线圈引出线有三根;三个霍尔元件电源线共用一根引出线,加一根公共接地线,再加三根信号线,共五根,驱动器的三根电源线接在电机的三根进线上,驱动器的三根信号接收线和电机的霍尔信号引出线相连,这三根线不能连接错误,否则电机无法正常运转,电机的电流就会很大,以致把驱动器的功率管烧毁。

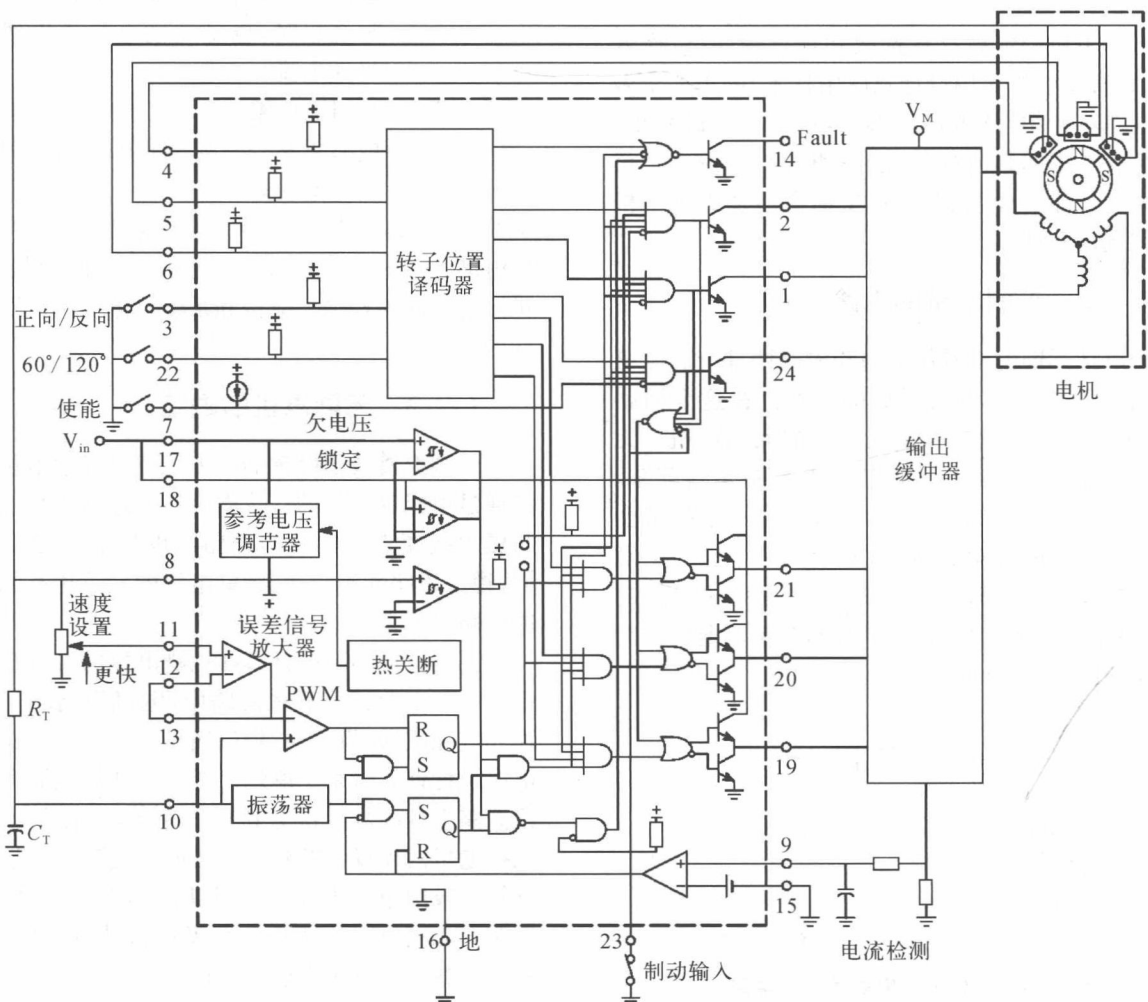


图 1-6 MC33035 无刷电机驱动线路(星形接法)