



普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材
顾 问 杨叔子 李培根 李元元

机电传动与控制

(第四版)

程宪平 © 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材
顾 问 杨叔子 李培根 李元元

机电传动与控制

主 编 程宪平



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书共分9章,内容包括:直流电机,交流电动机,控制电机,机电传动控制系统的基础,控制电器与继电器-接触器控制系统,可编程序控制器,直、交流电动机调速系统及步进电动机控制系统等。

本书内容全面,突出机电结合,电为机用。在保证基本内容的前提下,简化理论分析,加强反映当前机电领域的新技术和新知识,加强实例的分析、设计,力求做到内容深入浅出、重点突出,以利于读者开拓思路,深化知识。

书中线路图和电气原理图的符号均贯彻了新颁布的国家标准。

本书是机械设计制造及其自动化专业系列教材,可作为机械类专业及与之相近专业本科生的教材,也可作为机械类专业电大生、函大生、高职生等的教材,还可供从事机械、电气方面研究的工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动与控制/程宪平主编. —4版. —武汉:华中科技大学出版社,2015.12
普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5680-1467-0

I. ①机… II. ①程… III. ①电力传动控制设备-高等学校-教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 297122 号

机电传动与控制(第四版)

程宪平 主编

策划编辑:俞道凯

责任编辑:姚 幸

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:24.5 插页:2

字 数:520千字

版 次:2010年9月第3版 2015年12月第4版第1次印刷

定 价:42.80元



华中大版

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

普通高等学校机械制造及其自动化专业“十二五”规划教材

编 委 会

丛书顾问：杨叔子 华中科技大学

李培根 华中科技大学

李元元 华南理工大学

丛书主编：张福润 华中科技大学

曾志新 华南理工大学

丛书编委（排名不分先后）

吕 明 太原理工大学

张宪民 华南理工大学

芮执元 兰州理工大学

邓星钟 华中科技大学

吴 波 华中科技大学

李蓓智 东华大学

范大鹏 国防科技大学

王艾伦 中南大学

王 杰 四川大学

何汉武 广东工业大学

何 林 贵州大学

高殿荣 燕山大学

李铁军 河北工业大学

高全杰 武汉科技大学

刘国平 南昌大学

王连弟 华中科技大学出版社

何岭松 华中科技大学

邓 华 中南大学

郭钟宁 广东工业大学

李 迪 华南理工大学

管琪明 贵州大学

轧 刚 太原理工大学

李伟光 华南理工大学

成思源 广东工业大学

蒋国璋 武汉科技大学

程宪平 华中科技大学

第四版前言

“机电传动与控制”是高等工科院校中一门应用性很强的技术基础课,是机电一体化专业和非电子类专业学生掌握电方面的综合知识的一门课程,集电机、电机拖动、自动控制、电气控制技术与 PLC 技术于一体。随着计算机技术、电力电子技术、自动控制技术的发展,机电传动系统的控制已由继电器-接触器硬接线的常规控制转向以微机为核心的软件控制。特别是可编程控制器在机电传动系统中得到了广泛的应用。

为了适应新技术的发展、满足工程实际和教学改革的需要,我们对《机电传动与控制》(第三版)教材进行了修订。

本次修订的主要内容如下:

(1) 直流电机部分,在保留基础内容的条件下,简化理论分析,并删除了直流发电机内容;修订了伺服电机的内容。

(2) 削减了继电器-接触器控制的内容,在“可编程序控制器”一章中,以国内使用比较广泛的日本三菱公司 FX 系列 PLC 和德国西门子公司 S7 系列 PLC 为使用背景,介绍了 PLC 的基本结构与工作原理,以及指令系统与程序设计方法,并给出了一些应用实例。

(3) 替换了书中一些比较陈旧的图例和知识点。

本书可作为机电一体化、机械设计制造及其自动化等相关专业的教材,也可供从事机电设备工作的工程技术人员参考或作为培训教材使用。

参加本书(第四版)修订工作的有程宪平(修订第 1、2、3 章),陈艳(修订第 4、5、6 章)、曾海霞(修订第 7、8、9 章)。全书由程宪平、陈艳统稿和定稿。

在本书的修订过程中,参阅了许多优秀的著作,一些使用过本教材(第三版)的教师给本书的修订提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请使用本书的教师和读者批评指正。

编者

2015. 8

第三版前言

《机电传动与控制》(第二版)于2003年9月出版,至今已有6年之久。在这6年中,承蒙许多高校及读者使用本书,使它能继续发行。随着机电控制技术、计算机技术的迅猛发展,此时对本书的内容做一次修改则势在必行。尤其是经过多年的教学实践,深悉本书在内容上有修改的必要,希望这次的修改能做到与时俱进,适应教学改革及本学科发展的需要。

本书修改的主要内容可归纳为如下几个方面。

(1) 在保留直流电机、交流电动机的基础内容不变的条件下,简化理论分析,加强了控制电机内容,增加了“无刷永磁直流电动机”的基本内容。

(2) 在“可编程序控制器”一章中选用了日本三菱FX2N型PLC,延续了原F₁的基本知识,在内容上加强了基本的应用实例及实例设计,达到深化知识点,为进行创新设计开拓思路、奠定技术基础的目的;同时削减了继电器-接触器控制的内容。

(3) 在关于调速系统的内容中,介绍了最新科学动态,补充了微机数字化PWM控制、数字化变频器控制及无刷直流电动机调速系统的实例及分析。

参加本书(第三版)修改工作的有程宪平(修改第1、2、3、4、5、6章)、周北明(修改第7章)、陈艳(修改第8章)。程宪平负责全书修订的组织和最后定稿。

在本书的修改过程中,参阅了许多优秀的教材和论著,在此深表感谢。

修改后的全书在内容上有较明显的改进和提高,但由于编著者水平有限,书中不妥之处和错误在所难免,恳请使用本书的教师和读者批评指正。

编者
2009. 11

第二版前言

本书于1997年出版发行以来,历经4次印刷,得到了广大读者和有关专家的好评。经过对本书4年来使用的教学实践,特别是有关教师给我们提出了许多宝贵意见,深感需及时进行修订再版。

这次作为高等学校21世纪机械设计制造及其自动化专业系列教材而出版,在内容上作了修改。这次修改一方面是因本学科近年来的迅速发展,需要补充和更新内容。另一方面也希望在内容的选取和处理上更能适应教学改革,更充分反映本领域的基础理论知识、最新技术和发展趋势。

全书共分9章。第1、2章对直流电机、交流电动机的基本结构、工作原理、机械特性、启停和调速性能作了较详细的介绍,并从动力学角度分析了机电传动系统,为系统应用作好基础理论的准备;第3章较全面介绍了几种常用控制电动机,其中包括伺服电动机、步进电动机、直线电机等;在第4章机电传动控制系统基础的前提下,分别在后面5章中分析了各种传动控制系统。在内容安排上,首先较全面介绍各种常用的控制电器及继电器-接触器基本控制电路,分析了几种典型的控制系统实例。第6章介绍了可编程序控制器(PLC),对F₁系列的指令、程序及其基本电路进行了分析,使读者能具备基本的编程能力,并有不同形式实例可供参考、分析。第7、8章描述了一般的电力半导体器件、新型电力器件的特性为调速系统分析作基础准备。然后分别介绍了直流、交流调速系统,加强了脉宽调制和交流变频调速的内容。第9章对步进电动机开、闭环及其控制系统也作了较详细的叙述。在第5、6、8、9章介绍了典型的控制系统实例,使学生对机电传动与控制有了进一步的了解。

书中采用的电路图形符号、文字符号、有关术语及电气原理图的绘制,均贯彻GB 5094—1985、GB 4728—1985等新标准。

全书可作为机械类专业及与之相近专业的本科生教材,也可作为机械类专业电大生、函大生、高职生等的教材,并可供从事机械、电气方面的科学研究和工程技术人员参考。

全书由程宪平统稿,其中第1、4章由余伟芦编写,第2、3、8章由张忠夫编写,第7章由肖宏年编写。绪论及第5、6、9章由程宪平编写。

全书由东南大学冷增祥教授担任主审,他对全书进行了全面的审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处和错误在所难免,希望读者不吝赐教。

编 者

2002. 1

第一版前言

将机械技术与电子技术有机地结合,用电子技术改造传统产业,借以振兴机械工业,进而促进国民经济的发展,这就需要一批机电一体化的复合型人才。本书是为适应机电一体化系列教材的市场需求而编写的。机电传动与控制课程是从机电一体化技术需要出发,集电机、控制电器、电力拖动、自动控制系统于一体的课程。它是培养机电一体化应用型人才所需电知识的主干课程。通过本课程的学习,学生能掌握电机、电器、拖动控制等必备的基础理论,掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点及应用场所,具备一定的分析及处理机电传动与控制系统的实际能力,并了解最新控制技术在机械设备中的应用。

本书根据机械电子工程专业的需要独自建立了内容比较全面的体系。书中的内容有作者从事科研工作的一些经验,也有近年来从事教学工作的体会与总结。在内容处理上,既注重基础理论知识,又注意与实际应用相结合;既描述了器件的外特性,又着重器件在控制系统中的应用;既结合当前的国情介绍了目前广泛应用的机电传动与控制技术,又充分反映了本领域的最新技术和发展趋势。在文字叙述上力求言简意赅,叙述清晰。在内容安排上由浅入深,便于自学、便于掌握。

全书共分10章。第1、2章对直流电机、交流电动机的基本结构、工作原理、机械特性、启停和调速性能作了较详细的介绍,为系统应用作基础理论的准备;第3章较全面介绍了几种常用控制电机,以便正确选用和使用它们;在第4章机电传动控制基础理论的前提下,分别在后面5章中分析了各种传动控制系统。在内容安排上,首先介绍有触点逻辑控制系统,再介绍无触点连续控制系统。第5章较全面介绍各种常用的控制电器及继电器-接触器基本控制电路,分析了几种典型的控制系统实例,简介了基本设计方法;第6章可编程序控制器(PLC)是通过软件实现继电器-接触器的控制。对一种型号(F-40型PLC)的指令、程序编制及实例的介绍,使读者能具备基本编程的能力。第7、8章首先对电力半导体器件及其基本电路进行了描述,然后分别介绍直流、交流调速系统,并加强了脉

宽调制和交流变频调速的内容。第9章对步进电动机原理及其控制系统也作了较详细的叙述。第10章简述了电动机的选择。在第7、8、9章中都介绍了控制系统实例,并反映了当今本学科的新技术和新方法。

书中所采用的图形符号为国家标准 GB 4728—1985,文字符号为 GB 5094—1985,GB 7159—1987 等新标准。

本书可作为机械电子工程专业、机械制造专业以及与之相近专业的教材,也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

全书由程宪平统稿,其中第1、4、10章由余伟芦编写,第2、3、8章由张忠夫编写,第7章由肖宏年编写。绪论及第5、6、9章由程宪平编写。

全书由华中理工大学邓星钟教授担任主审。他提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中的不足之处和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1995.11



机电传动与控制

绪论 机电传动与控制	(1)
第 1 章 直流电机	(4)
1-1 直流电机的基本结构与工作原理	(4)
1-2 直流电动机的机械特性	(10)
1-3 机电传动系统运动的理论基础	(16)
1-4 生产机械的机械特性	(21)
1-5 直流他励电动机的启动与调速	(26)
1-6 直流他励电动机的制动	(30)
习题与思考题	(36)
第 2 章 交流电动机	(40)
2-1 三相异步电动机的基本结构与工作原理	(40)
2-2 三相异步电动机的定子电路与转子电路	(46)
2-3 三相异步电动机的转矩与机械特性	(49)
2-4 三相异步电动机的启动性能与方法	(56)
2-5 三相异步电动机的调速方法	(66)
2-6 三相异步电动机的制动	(70)
2-7 单相异步电动机	(74)
2-8 同步电动机	(78)
习题与思考题	(81)
第 3 章 控制电机	(83)
3-1 伺服电动机	(83)
3-2 微型同步电动机	(93)
3-3 测速发电机	(98)
3-4 步进电动机	(103)
3-5 直线电动机	(110)
3-6 旋转变压器	(117)

3-7 感应同步器	(122)
习题与思考题	(127)
第4章 机电传动控制系统的基础	(129)
4-1 机电传动控制系统的组成及方案选择	(129)
4-2 选择电动机额定功率的基本依据	(136)
4-3 电动机的发热与冷却	(137)
4-4 不同工作方式下电动机容量的选择	(139)
4-5 电动机的种类、额定电压、额定转速及形式的选择	(145)
习题与思考题	(146)
第5章 控制电器与继电器-接触器控制系统	(148)
5-1 常用控制电器	(148)
5-2 生产机械电气设备的基本控制线路	(157)
5-3 生产机械的继电器-接触器控制线路	(171)
5-4 继电器-接触器控制线路的设计方法	(177)
习题与思考题	(184)
第6章 可编程序控制器	(186)
6-1 可编程控制器基础知识	(186)
6-2 FX 系列 PLC 及指令系统	(201)
6-3 S7 系列 PLC 及指令系统	(223)
6-4 可编程序控制器的应用	(255)
习题与思考题	(265)
第7章 直流电动机调速系统	(268)
7-1 电力半导体器件	(269)
7-2 可控整流电路	(277)
7-3 逆变与脉宽调制	(290)
7-4 电力半导体器件和装置的保护	(296)
7-5 单闭环直流调速系统	(300)
7-6 双闭环直流调速系统	(309)
7-7 晶闸管-电动机可逆调速系统	(312)
7-8 晶体管直流脉宽调速系统	(314)
习题与思考题	(321)
第8章 交流电动机调速系统	(324)
8-1 晶闸管交流调压调速系统	(324)
8-2 交流电动机变频调速系统	(330)
8-3 其他交流调速系统	(342)

习题与思考题	(352)
第 9 章 步进电动机控制系统	(354)
9-1 步进电动机的环形分配器	(354)
9-2 步进电动机的驱动电路	(358)
9-3 步进电动机的传动与控制	(362)
9-4 步进电动机的应用	(368)
习题与思考题	(370)
附录	(372)
附录 A 常用电气图形符号	(372)
附录 B 常用电气文字符号	(376)
部分习题与思考题的参考答案	(378)
参考文献	(379)



机电传动与控制

一、机电传动与控制的目的与意义

在现代化生产中,生产机械的先进性和电气自动化程度反映了工业生产发展的水平。现代化机械设备和生产系统已不再是传统的单纯机械系统,而是机电一体化的综合系统,电气传动与控制系统已成为现代化机械的重要组成部分。因此:从广义上讲,机电传动与控制就是要使生产机械设备、生产线、车间甚至整个工厂都实现自动化;具体地讲,就是以电动机为原动机驱动生产机械,将电能转换为机械能,实现生产机械的启动、停止及调速,满足各种生产工艺过程的要求,实现生产过程的自动化。因此,机电传动与控制既包含了拖动生产机械的电动机,又包含了控制电动机的一整套控制系统。

现代化生产要求有高的生产自动化程度,高的加工效率,大的工艺范围,能加速产品更新换代和开发数字化、自动化、智能化的机电一体化的产品,这无疑对机电传动与控制系统提出了越来越高的要求。而今特别突出的是电子、航空、航天及汽车工业等高新技术工业的发展,都依赖于机械工业制造技术,以及由“重大长厚”型转向“轻小短薄”型的工艺设备的发展。而每一次新技术的出现,都是同新型的加工方法、加工手段和测量控制技术的出现密切相关的。目前,我国正在加速制造技术领域的发展,引进国外先进技术,吸收新技术成果,并正在加快单机自动化、局部生产过程自动化、生产线自动化和全厂综合自动化的步伐。这些都离不开机电传动与控制。

随着计算技术、微电子技术、自动控制理论、精密测量技术的发展,随着电机及电器制造业及各种自动化元件的发展,机电传动与控制正在不断创新与发展。目前直流或交流无级调速控制系统代替了结构复杂、笨重的变速箱系统,简化了生产机械的结构,使生产机械向性能优良、运行可靠、质量小、体积小、自动化的方向发展。近20年来各种机电一体化产品,如数控机车、工业机器人、电力机车、静电复印机、电动汽车、计算机磁盘光盘驱动器等都是现代生产机械自动化的成果,可见机电传动与控制在整个生产机械中占有极其重要的地位。为了培养新世纪机电一体化的复合型实用人才,必须掌握机电传动与控制的理论和方法。

二、机电传动与控制系统的概况

1. 机电传动的发展

机电传动的发展是随着电机的发展而发展的。20世纪以前,电机的发展处于初级阶段,经历了由诞生到在工业上的初步应用,各种电机初步定型,电机理论和电机设计计算方法的建立和发展的过程。20世纪是自动化发展的时代,对电机也提出了越来越高的要求,使电机向性能良好、运行可靠、质量小、体积小的发展方向发展。随着自动控制系统的发展及广泛应用,出现了多种高可靠性、高精度、快速性能好的控制电机。目前动力电机正在向大型、巨型化发展,而专用电机正在向着高精度、长寿命、微型化发展。由于各类电机已成为各种机电系统中的极为重要的元件,因此,机电传动将发展成为把电子学、电机学和控制论结合在一起的新兴学科。

电动机的问世使电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。机电传动的发展大体经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动三个阶段。所谓成组拖动是指一台电动机经天轴(或地轴)由带传动来驱动一组生产机械的拖动方式。这种拖动方式的传动路线长、生产效率低、结构复杂,一旦电动机发生故障,将造成成组生产机械的停车,现早已被淘汰。生产机械中广泛采用的单电机拖动,即一台电动机拖动一台生产机械,较成组拖动前进了一步,它适合于中小型机械,但生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂。自20世纪30年代起,广泛采取了多电机拖动方式,即一台生产机械的每个运动部件分别由一台专门的电动机拖动方式,这样生产机械的结构就大为简化了。例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构均分别由一台电动机拖动。在生产机械中也有一个运动部件采用多电动机拖动的。例如,链式输送机的工作机构是一条长的链式运输带,它往往采用多台电动机拖动的方式。这种多电机拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件。

2. 控制系统的发展

随着生产的不断发展,现代机电传动要求实现局部或全部的自动控制。随着电机及各种自动控制器件的发展,机电传动控制系统也正在不断创新与发展。它主要经历了如下四个阶段。

继电器-接触器自动控制系统,这是借助继电器、接触器、按钮、行程开关等电器元件组成的控制系统,能实现对控制对象的启动、停车及有级调速等控制,这是属于有触点的逻辑控制系统。它的结构简单、价格低廉、维修方便,广泛地应用在机床和其他机械设备上。但它的控制速度慢、控制精度差、灵活性差、可靠性不高。

20世纪40至50年代的交磁放大机-电动机控制系统,从断续控制发展到了连续控制,系统可随时检查控制对象的工作状态,能对控制对象进行自动调整,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制系统,并简化了控制系统,生产效率也提高了,但系统存在体积大、响应慢、旋转噪声大等缺点。

20世纪60年代晶闸管的出现,使得晶闸管-直流电动机无级调速系统得到发展。晶闸管具有功率大、体积小、效率高、动态响应快、控制方便等优点,并正在向大容量方向发展。继晶闸管出现后,又陆续出现了具有可控制的全控型器件和功率集成电路,例如可关断晶体管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(P-MOSFET)、复合电力半导体器件(IGBT、MCT)等。尤其是绝缘栅双极晶体管(IGBT)的应用更是广泛。由于逆变技术的出现和高压大功率晶体管的问世,20世纪80年代以来,交流电动机无级调速系统有了迅速的发展。由于交流电动机无电刷和换向器,较之直流电动机易于维护,且寿命长,因此,交流调速系统很有发展前途,如今用大功率晶体管逆变技术和脉宽调制技术(PWM)改变交流电的频率等实现电动机无级调速的系统,在工业上正在得到广泛的应用。目前已出现了多种以微机为核心的数字化变频器调速系统,它使交流电动机的控制变得更简单,可靠性更高,拖动系统的性能更好,为机电传动与控制开辟了新途径。

随着数控技术和微型计算机的发展,出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程序控制器(PLC),用它可代替大量的继电器,使硬件软件化。它实际上是一台按开关量输入的工业控制用的微型计算机。用它来替代继电器-接触器控制系统,提高了系统的可靠性和柔性,使控制技术产生了一个飞跃。20世纪90年代的大型PLC正向着高速度、多功能、适应多级分布控制系统的方向发展,同时微型PLC已发展成不仅具有开关型逻辑控制、定时/计数、逻辑运算功能,还具有处理模拟量的I/O功能、数字运算功能、通信功能,可构成分布式控制系统的控制器,因此,它的应用越来越普遍,越来越广泛。它已是机电传动与控制的重要器件。

随着微电子技术 with 计算技术的不断发展,机电传动与控制正向着计算机控制的生产过程自动化方向前进。它经历了硬件数控(NC)→计算机数控(CNC)→柔性制造单元,即加工中心(FMC)→柔性制造系统(FMS)→计算机集成制造系统(CIMS)的过程。20世纪80年代末出现的由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统,它是机械制造的自动化车间和自动化工厂的重要组成部分与基础。21世纪,将是计算机集成制造系统的时代。利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的一体化,使产品构思、设计、装配、试验和质量管理全过程实现自动化,是当今世界机电一体化发展的新趋势。



直流电机

直流电机是机械能和直流电能互相转换的旋转机械装置。直流电机可作为电动机,将电能转换为机械能;也可作为发电机,将机械能转换为电能。

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。

直流电动机虽然比三相异步电动机的结构复杂,维护也不方便,但由于它的调速性能较好,启动转矩较大,因此,在速度调节要求较高,正反转和启制动频繁,或多单元同步协调运转的生产机械上,仍采用直流电动机来拖动,例如,龙门刨床、镗床、轧钢机等均采用直流电动机作动力。

直流发电机可作为直流电源,例如,作为直流电动机,同步电机励磁,蓄电池充电,汽车、船舶上的用电,电镀、电解、电焊等方面的直流电源。由于直流发电机的构造复杂,价格昂贵,目前已被晶闸管等整流设备逐渐取代。但从电源的质量与可靠性来说,直流发电机有其优点,至今直流发电机仍有应用。

本章主要讨论直流电机的基本工作原理及其特性,特别是直流电动机的机械特性及启动、调速、制动的基本原理和基本方法。

1-1 直流电机的基本结构与工作原理

一、直流电机的基本结构

直流电机可概括地分为静止和转动两大部分。静止部分称为定子,转动部分称为转子,定、转子之间由空气隙分开,其结构如图 1-1(a)所示,图 1-1(b)所示为直流电机剖面示意图。

1. 定子部分

定子由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。

(1) 主磁极 它的作用是产生恒定的主极磁场,由主磁极铁芯和套在铁芯上的励磁绕组组成。铁芯的上部称为极身,下部称为极掌。极掌的作用是减小气隙的磁阻,使气隙磁通沿气隙空间分布得更均匀,并支撑绕组。为了保证各励磁电流严格相等,励磁绕组相互间一般采用串联连接,而且在连接时要保证 N、S 极交替出现。