



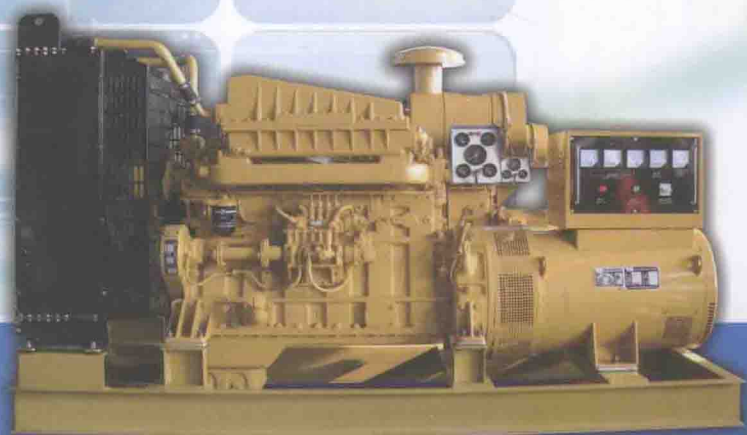
交通版高等职业教育规划教材

船舶电气与控制

Marine Electrical and Control Equipments

主 编 高兴斌

主 审 张均东



人民交通出版社
China Communications Press

交通版高等职业教育规划教材

Marine Electrical and Control Equipments

船舶电气与控制

高兴斌 主编

张均东 主审

人民交通出版社

(说明页或书本出社图例部回益正行好, 编印者)

内 容 提 要

本书按照 2011 版《中华人民共和国海船船员船舶电气与自动化(轮机员)适任考试大纲》、《中华人民共和国海船船员船舶电气(电子电气员)适任考试大纲》,中国船级社《钢质海船入级规范》(第 4 分册)的要求和内容,在作者多年从事船舶电气与控制系统教学、科研和实船工作经验的基础上进行编写。

全书共 12 章,主要内容包括直流电机、变压器、异步电动机、同步电机、控制电机、电力拖动基础、电力拖动的继电—接触器控制、机舱辅机电力拖动及控制系统、甲板机械电力拖动及控制系统、舵机电力拖动及控制系统、船舶照明及航行信号灯系统、船舶电气安全与管理以及附录。

本书适合作为轮机工程、船舶电子电气技术、船舶工程等专业的教材,或轮机员、电子电气员适任考证教材,也可作为该领域教师、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气与控制 / 高兴斌主编. —北京:人民交通出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-114-10956-0

I. ①船… II. ①高… III. ①船用电气设备—电气控制 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 252317 号

书 名:船舶电气与控制

著 者:高兴斌

责任编辑:赵瑞琴

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16

字 数:360 千

版 次:2013 年 12 月 第 1 版

印 次:2013 年 12 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10956-0

定 价:38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

《船舶电气与控制》按照青岛远洋船员职业学院技能型人才培养特色名校建设方案中轮机工程技术和船舶电子电气技术重点专业建设要求进行编写,是优质核心课程建设的重要内容,且获批为学院特色教材。本教材按照国家海事局轮机员(包括二、三管轮及大管轮)、电子电气员适任考试大纲中“船舶电气与控制系统”部分的要求进行编写,适用于轮机工程、船舶电子电气技术、船舶工程等专业的“船舶电机”、“电力拖动及控制系统”课程,也可作为三管轮、电子电气员适任考试的相关培训教材。由于在海事局新的考试大纲中,大管轮的“船舶电气与自动化”科目中增加了较多的船舶电气内容,本教材也可作为大管轮适任考试的相关培训教材。

本教材中部分只针对船舶电子电气员的内容均在标题前标有*号。

本教材在满足传统教学内容的基础上,另有以下特点:

1. 增加了部分新技术的内容:如异步电动机的软启动、大型电力变压器的预充磁、电动机的启动控制模块、LED照明技术等,以适应船舶电气及控制的新发展。
2. 强调对船舶实际电气管理工作的学习及实际问题能力的培养,在电机、控制电路、照明系统等部分,都有详细的维护保养和故障处理内容。
3. 针对电子电气员,增加了部分液压及控制系统的内容,以符合其考试大纲的要求。
4. 将船舶照明系统独立作为一章,还重点介绍了重要的照明控制电路,如船舶信号灯电路。
5. 在船舶电气管理中,介绍了重要的电工仪表、电气材料、电缆等内容,突出了对具体电气管理工作方法的学习。

随着STCW公约马尼拉修正案的履约,为我国从船员大国向船员强国的转变提供了新的契机。为适应船员教育培养高技能型人才的要求,需要海事院校、海事管理部门、航运公司加强合作,紧跟现代船舶的发展趋势,强化教育培训中的理论与实践结合、工学结合。本教材在这方面进行了大胆的尝试,在编写过程中,中国海事服务中心、山东省海事局提供了重要参考资料和指导,中远集团青岛远洋运输公司安监部、香港航运有限公司机务部、中远船务提供最新

实船资料,并参与了部分章节的编写,特在此表示衷心感谢!

本书由青岛远洋船员职业学院高兴斌主编,并负责各章节的编写和全书的修改与统稿。另外,青岛远洋运输公司安监部王日亭轮机长、电机员参与第八章第一节的编写,香港航运有限公司机务部付继武电机员参与了第九章第三节的编写。

本书由大连海事大学轮机工程学院张均东教授主审。张均东博导对许多内容的编写提出了宝贵意见,并提供了一些最新的技术资料,特在此也表示衷心感谢!

另外,还要感谢大连海事大学林叶锦教授,上海海事大学林叶春老师,以及青岛远洋船员职业学院孙旭清、张桂臣、韩加卓老师等对本教材编写进行的指导及提供的资料,感谢孙成明、张冬梅、马玉丽、殷志飞等老师参与教材的校稿。由于新大纲的实施尚处在起步阶段,没有足够的教学和考试经验,并且用一本书覆盖多门考试大纲也有很大的困难,以及本人水平有限,编写时间仓促,对本教材中的错误及不足之处,恳请大家在使用中提出宝贵意见。

编者

2013年8月

目 录

第一章 直流电机	1
第一节 直流电机的工作原理与构造	1
第二节 直流电机的励磁方式和运行特性	4
第三节 直流电机的维护保养	10
第二章 变压器	12
第一节 变压器的结构及工作原理	12
第二节 变压器的同名端	16
第三节 特殊变压器	17
第四节 三相电力变压器	19
第三章 异步电动机	23
第一节 三相异步电动机的结构	23
第二节 三相异步电动机的铭牌参数	25
第三节 三相异步电动机的工作原理及机械特性	29
第四节 单相异步电动机	39
第五节 交流电机的维护保养与故障修复	42
第四章 同步电机	51
第一节 同步电机的种类与结构	51
第二节 同步发电机的基本特性及电枢反应	54
第三节 同步电动机	58
第五章 控制电机	60
第一节 测速发电机的种类和用途	60
第二节 伺服电机	66

* 第三节	步进电机	71
第四节	自整角机	74
第六章	电力拖动基础	77
第一节	电力拖动系统负荷性质及典型生产机械	77
第二节	鼠笼式交流异步电动机的起动	80
第三节	交流电动机的制动	84
第四节	交流电动机的调速	89
第五节	船舶电站对直接起动电动机的容量要求	92
第七章	电力拖动的继电-接触器控制	95
第一节	常用控制电器	95
第二节	电气控制线路图	108
第三节	三相异步电动机基本控制环节	109
第四节	三相异步电动机典型控制电路	114
第五节	电动机保护环节	118
第六节	电动机控制线路故障查找与维护	120
第八章	机舱辅机电力拖动及控制系统	127
第一节	泵的控制	127
第二节	压缩机的控制	135
第三节	自清洗滤器的自动控制	140
第九章	甲板机械电力拖动及控制系统	145
第一节	起货机的电力拖动与控制要求	145
第二节	交流恒转矩变极调速起货机的控制	147
第三节	电动液压起货机	152
第四节	锚机、绞缆机的电力拖动与控制	164
第五节	交流变极调速电动锚机控制线路	168
* 第六节	船用电梯系统的安全保护	171
第十章	舵机电力拖动及控制系统	176
第一节	舵机装置概述	176
第二节	舵机拖动与控制系统的的工作原理	179

* 第三节	自适应自动舵	188
* 第四节	液压舵机的控制	191
第五节	舵机拖动与控制系统故障处理	195
第十一章	船舶照明及航行信号灯系统	198
第一节	船舶照明系统的分类及特点	198
第二节	船舶常用灯具与电光源	200
第三节	船舶照明系统供电及控制	206
第四节	船舶照明系统的维护保养及故障处理	210
第十二章	船舶电气安全与管理	213
第一节	船舶电气安全	213
第二节	船舶电气管理与检验	218
第三节	常用电工仪表	224
第四节	船用电缆	228
附录一	海船轮机员(二、三管轮及大管轮)《船舶电气与自动化考试大纲》中船舶 电气与控制系统的相关内容	231
附录二	海船电子电气员《船舶电气考试大纲》中船舶电气与控制系统的相关内容	234
附录三	常用控制电器图形符号	237
参考文献		246

第一章 直流电机

直流电机是电机的主要类型之一,是实现机械能和直流电能互相转换的一种很重要的旋转机械装置。在作为电动机使用时,它将电能转换为机械能,并具有调速设备简单,调速性能良好,起动、制动转矩大以及过载能力强等优点,被广泛应用于电车、轧钢机和起重设备中。直流电机与交流电机比较,其缺点是直流电压不能变换以及结构复杂、造价高和维修工作量较大等。

20世纪80年代以来,由于大功率电力电子技术的发展,交流变频技术已经在很多领域取代了直流调速的应用,因此直流电机的应用逐渐减少,但在小功率控制电机的领域仍有大量的使用。

第一节 直流电机的工作原理与构造

一、直流电机的工作原理

1. 直流电机模型

图 1-1 是最简单的直流电机模型。N、S 是一对静止不动的主磁极,它们之间有一转动的圆柱形电枢铁芯,其上有一电枢线圈,线圈两端 a、d 分别接到彼此绝缘的两个半圆形换向片上。两个位置固定的电刷分别压在两换向器片上。电刷与转动的换向器片形成滑动接触的导电机构。

当直流电机接通直流电源时,则成为直流电动机。在电源电压的作用下电枢线圈中产生了电流。假设电流由图 1-1 中的“+”流入,从“-”流出,通过换向器的作用,使转到 N 极下的线圈边中的电流方向总是流出,S 极下的总是流入。电流的方向总是 d-c-b-a;这样电枢电流与磁场相作用所产生的电磁转矩方向始终保持不变,因而驱动转子向一个顺时针方向转动。电动机的电磁转矩是拖动负载的转矩。刚开始时由于电流较大,电磁转矩高于负载转矩,电动机加速旋转。电动机在旋转的过程中,电枢线圈也切割磁场而产生电动势,根据右手定则,该电动势的方向总是与电流方向相反,故称电动机的电动势为反

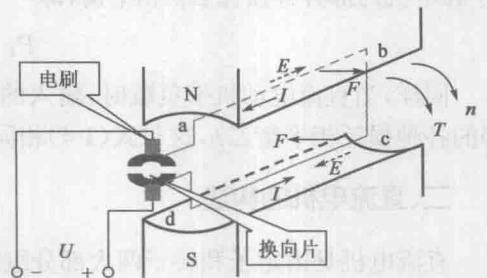


图 1-1 直流电机原理图

电动势。假如外加电枢电压 U 不变,随着转速的提高,反电动势 E 增加,电枢电流 I_a 减小,三者之间的关系为

$$U = E + I_a R_a \quad (1-1)$$

式中: R_a ——电枢绕组的电阻。

可见,随着电枢电流 I_a 的减小,电动机的电磁转矩也同步减小,当与负载转矩一致时,电动机进入恒定转速旋转,从而使系统进入平衡稳定状态。

2. 直流电机的电枢电动势和电磁转矩

直流发电机和直流电动机是直流电机的两种运行状态。在两种运行状态下,当电枢以一定的转速向一个方向旋转时,嵌在电枢槽内的电枢绕组便切割磁通产生感应电势。在直流发电机中,感应电势的方向和电枢电流相同,向外输出功率;而在电动机中,感应电势的方向和电枢电流相反,从外加电源吸收功率。根据电磁感应定律,感应电势的大小正比于每极的磁通 Φ 及电枢转速 n ,其计算公式可以表示为

$$E = C_e \Phi n \quad (1-2)$$

式中: C_e ——与电机结构有关的比例常数,称为电势常数。

同样,在直流发电机和直流电动机中,电枢绕组中的电流与气隙磁场相互作用产生电磁转矩。根据左手定则判断,在直流电动机中电磁力矩的方向和转向相同,是拖动负载的转矩;而在发电机中,电磁力矩的方向和转向相反,与拖动转矩也相反,为制动转矩;而拖动转矩与转向相同方向,是原动机的驱动输出,发电机的电磁转矩相当于原动机的负载。直流发电机将机械能转换为电能,直流电动机则将电能转换为机械能。无论是发电机还是电动机,电磁转矩 T 正比于电枢电流 I_a 及每极磁通 Φ ,其计算公式为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-3)$$

式中: C_T ——与电机结构有关的常数,称为转矩常数。

电磁转矩所对应的功率称为电磁功率,根据功率的计算公式和电磁感应的公式可以推导出电磁功率,即由电磁转矩和角速度相乘,也可以是感应电势和电枢电流的乘积,所以电磁功率是机械能转换为电能的转换环节。

在能量转换的过程中必然有损耗。直流电机的损耗有以下几种:机械损耗、铁芯损耗、励磁和电枢绕组的铜损耗等。当直流发电机带负载时,输入的机械功率 P_1 应与输出的电功率 P_2 和电机内部各种损耗 $\sum p$ 相平衡,即

$$P_1 = P_2 + \sum p \quad (1-4)$$

同样,当直流电动机带负载时,输入的电功率 P_1 应与轴上输出的机械功率 P_2 和电机内部的各种损耗相平衡 $\sum p$,这与式(1-4)相同。

二、直流电机的构造

直流电机是由定子和转子两大部分组成:定子是由主磁极、换向极、机座、端盖和电刷装置等组成;转子是由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。图 1-2 为直流电机的解体图。

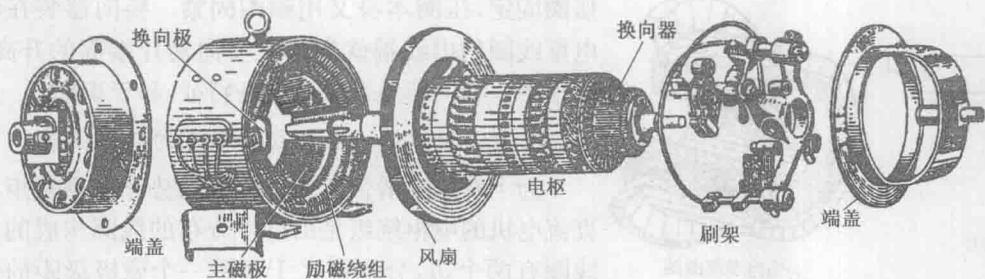


图 1-2 直流电机解体图

1. 定子主要部件

1) 主磁极

主极铁芯由薄钢板冲片叠成,其上套有励磁绕组,并用螺栓固定在机座上。励磁绕组中通入直流励磁电流产生主磁场。

2) 换向极

其铁芯一般是由整块钢制成的,尺寸比主极小,也用螺钉固定在机座上;在定子机座圆周上的安装位置与主磁极相间分布。换向极用于改善换向,以减少因电磁原因而引起的电刷下的火花。换向极绕组与电枢电路串联,由电枢电流所产生的换向极磁场与电枢绕组电流所产生的交轴电枢反应磁场方向相反。它不仅用来抵消电枢反应磁场,而且使处于换向的绕组切割换向极磁场以产生可抵消电流换向引起的感应电动势,达到减少换向火花的目的。

3) 机座

它是直流电机的固定支撑和防护的部件,又是磁路的一部分。有磁通经过的部分称为磁轭。机座通常是由铸钢制成或由钢板卷焊而成。

4) 电刷装置

主要由刷架、刷杆、刷握、炭刷及压紧弹簧等组成。中小型电机刷架装在端盖或轴承内盖上,大中型电机刷杆座固定在机座上。电刷装置将装在刷架的刷杆上。为减少由机械原因而引起的电火花,炭刷插在刷握中应既能上下自由移动又不晃动,而且随着炭刷的磨短应及时调整压紧弹簧,以保持与换向器适当的接触压力。对于多对磁极多对电刷的直流电机,正、负电刷分别并联在一起,然后只引出两个接线端。

2. 转子主要部件

1) 电枢铁芯

由硅钢片叠成,固定在转子支架或转轴上。铁芯圆周上均匀分布的槽内嵌放电枢绕组。电枢铁芯是磁路的一部分。

2) 电枢绕组

电枢绕组用以产生电动势和通过电流,是实现机电能量转换的重要部件。电枢绕组由绝缘铜线绕制而成,各绕组线圈的两个出线端按一定的规律焊接到换向器片上,形成一闭合回路。

3) 换向器

换向器的作用是将电枢线圈中的交流变为直流或相反。图 1-3 为换向器的外形及剖面图,它是由许多楔形铜片(换向片)叠成圆筒形,片间用云母绝缘。换向器片放置在套筒上;用

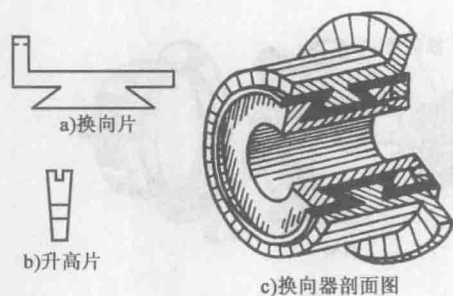


图 1-3 换向器的结构

压圈固定,压圈本身又用螺帽固紧。换向器装在轴上。电枢线圈的出线端就焊接在换向器片端部的升高片的小槽中。换向器是直流电机的特征,易于识别。

3. 直流电机的电枢绕组和电刷的正确位置

为了获得平滑恒定的直流电动势和电磁转矩,实际直流电机的电枢绕组是由许多分布的线圈构成的,每个线圈有两个边,分别置之于一相距一个磁极极距的位置,即这些线圈沿电枢铁芯圆周均匀分布,并通过相应数量

的换向器片依次串联构成一个闭合回路(图 1-4)。电枢线圈越多、相邻线圈边的分布间隔越小,则电刷间的电动势越高,越平滑恒定。电刷间的电动势,等于任一支路各线圈电动势之和。

电刷的位置正确与否,将影响到正负电刷间的电动势 E ,从而影响到发电机的电压和电动机的转速,同时电刷的位置也影响到电刷下的火花。两个磁极间的平分线称为磁场几何中性线。确定电刷正确位置的原则是,使正负电刷间能获得最大电动势。根据实际电枢绕组元件对称的几何形状,只有当电刷分别与位于磁场几何中心线的线圈所接的换向片相接触时,才能使被电刷分割的每一并联支路中各线圈感应电动势的方向一致,串联电动势之和最大。同时当任一线圈转到磁场几何中性线($\Phi=0$)处时,它将被电刷短路,由于此时线圈切割的电动势为零,故线圈中不会产生通过电刷的短路环流,因而空载运行时,也就没有电刷火花产生。

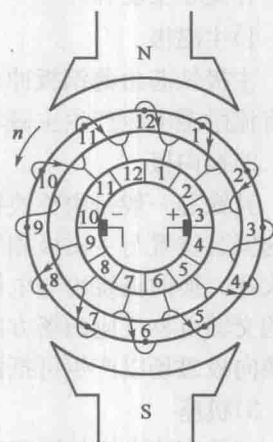


图 1-4 直流电机绕组示意图

若电刷位置不正确,将产生去磁性或增磁性电枢反应,使 E 减小或增大,从而影响发电机的电压和电动机的转速。为了保证电刷的正确位置,通常在刷架与端盖或刷架与定子之间都有正确装配的“标记”。在运行管理中应经常注意检查,若发现刷架松动或移位,应按“标记”加以校正和固定。

电机有载运行时,各电枢线圈不断地从一支路经电刷短路进入另一支路。在被电刷短路期间线圈中的电流也要反向,这种电流反向的变化过程称为换向。当电流从 $+I$ 变化到 $-I$ 的过程中,在换向线圈中必然引起感应电动势以反抗电流的变化,这种电动势是引起火花的原因之一。特别是当电枢电流过大时,由于磁路的饱和,换向极磁通的作用不能完全抵消引起火花的电动势,从而使火花变大,严重时甚至形成环弧而烧损换向器。

第二节 直流电机的励磁方式和运行特性

一、直流电机的励磁方式

定子上的主磁极和转子上的电枢绕组是直流电机最基本的两个组成部分,它们之间的连接方法不同,则电机的运行特性往往有较大的差别。电刷引出的转子上的绕组称为电枢回路,

流过电枢回路的电流为 I_a 。主磁极的励磁绕组称为励磁回路,流过励磁回路的电流为 I_f (图 1-5 表示直流电机的励磁和电枢回路)。电源供给电动机或者发电机发出到负载的电流为 I 。直流电机主磁极的励磁电流有几种不同的供给方式。励磁方式不同,电机的运行特性不同,图 1-6 表示不同励磁方式时,励磁绕组和电枢绕组的连接方式(图中标出的电流方向是以发电机为例,若是电动机需将 I_a 和 I_f 的方向反向)。

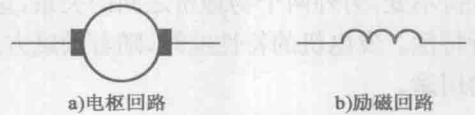


图 1-5 直流电机各回路的表示符号

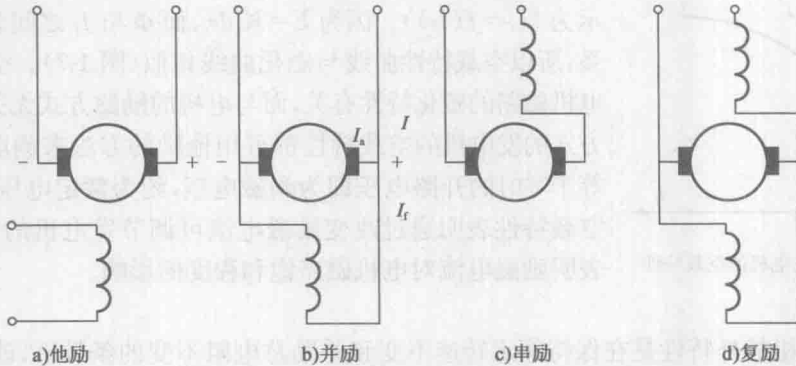


图 1-6 直流电机的励磁方式

按励磁绕组与电枢绕组的连接关系,可统一将直流电机分为他励、并励、串励和复励四种。

1. 他励电机

励磁绕组电路不与电枢电路连接,励磁电流可由独立电源供给。

2. 并励电机

励磁绕组电路与电枢电路并联。并励绕组导线细、匝数多、电阻大,励磁电流远小于电枢电流。

3. 串励电机

串励绕组与电枢绕组串联,电枢电流即为励磁电流。因此串励绕组导线粗、匝数少、电阻极小。

4. 复励电机

主磁极上既有并励绕组又有串励绕组。

对于发电机而言,还可以分类为他励和自励两大类。他励发电机的励磁电流是由独立的电源供给,不受发电机电压和电流的影响;自励发电机的励磁电流是由发电机的电枢电路提供,因而励磁电流受电枢电流和电压的影响。直流电动机的励磁电流都是由外电源供给。

二、直流电机的运行特性

发电机由原动机拖动,一般转速是保持不变的。除转速外,由外部可测的量有三个,即端电压、负载电流和励磁电流。下面要讨论的是当发电机正常稳态运行时,三个物理量中有一个

保持不变,另外两个物理量之间的关系,这些关系可以表征发电机的性能,称之为发电机的运行特性。发电机的特性曲线,随着励磁方式的不同而不同,不同励磁方式的发电机适用于不同的用途。

1. 直流发电机的运行特性

1) 空载特性

空载特性(亦可称为开路特性)是当发电机空载($I=0$)及保持额定转速不变时,电枢电动势(或空载电压 U_0)与励磁电流 I_f 之间的关系: $E=f(I_f)$ (或表示为 $U_0=f(I_f)$)。因为 $E=K_e\Phi n$,而 Φ 与 I_f 之间为磁化曲线关系,所以空载特性曲线与磁化曲线相似(图 1-7)。空载特性只与电机磁路的磁化特性有关,而与电机的励磁方式无关。各种励磁方式的发电机的空载特性都可用他励的方法来测取。励磁电流等于零时的开路电压即为剩磁电压,约为额定电压的2%~5%。空载特性表明通过改变励磁电流可调节发电机的电压,同时也表明励磁电流对电机磁路饱和程度的影响。

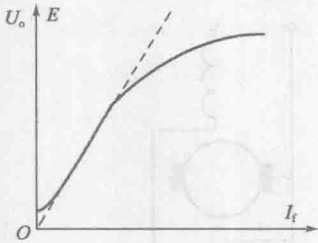


图 1-7 直流发电机的空载特性

2) 外特性

直流发电机的外特性是在保持额定转速不变和并励总电阻不变的条件下,改变负载大小时,发电机的端电压随负载电流而变化的关系 $U=f(I)$;引起发电机端电压随负载电流而变化的程度不仅与电枢内阻压降有关,而且与励磁方式有关。

图 1-8 分别为他励发电机、并励和复励发电机的接线图。图中 R_a 表示电枢电路的电阻, I_a 表示电枢电路的电流。

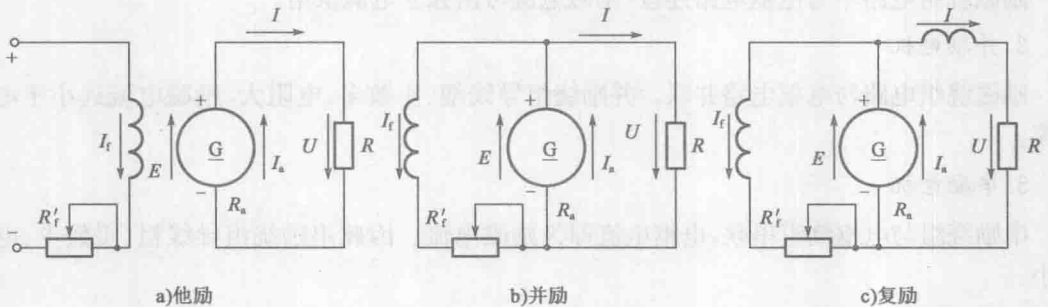


图 1-8 直流发电机的接线图

从图示电路可以看出,直流发电机电枢电路的电压平衡方程为

$$U = E - I_a R_a \tag{1-5}$$

他励发电机(图 1-8a))的电枢电流 I_a 等于负载电流 I ,而并励和复励(图 1-8b)和 c))的电枢电流等于负载电流和励磁电流之和,即

$$I_a = I + I_f \tag{1-6}$$

由于 I_f 远小于额定负载电流 I ,因此他励和自励发电机的电枢电阻压降 $I_a R_a$ 随负载的增加而使电压下降的情况差别不大,而它们的电动势 E 受负载电流影响的情况则不相同。

他励发电机的励磁电流 I_f 与电枢电流无关,故电动势 E 基本保持不变,因此只有很小的

电枢电阻引起端电压的微小变化,其外特性曲线如图 1-9 曲线 1 所示。而并励发电机则不然,电枢电阻引起端电压的下降将进一步引起并励电流及感应电动势的减小,电动势的减小又使电压进一步下降,故并励发电机的外特性曲线(曲线 2)比他励的低。

复励发电机根据串励绕组励磁电流方向与并励磁场方向的关系可分为积复励发电机和差复励发电机。串励与并励磁场方向一致的复励发电机称为积复励发电机。因为主磁极上的串励绕组的励磁电流将随负载电流的增加而增加,主磁通和电动势都将随负载电流的增加而增加,这样就可以补偿由于电枢电阻等所引起的端电压的下降,可使负载端电压基本保持不变。根据串励绕组对端电压的补偿程度又分为平复励、欠复励和过复励发电机,其外特性曲线分别如图 1-10 中的各相应曲线所示。当供电线路较长时通常采用过复励发电机,而船舶主电源直流发电机多为平复励发电机。

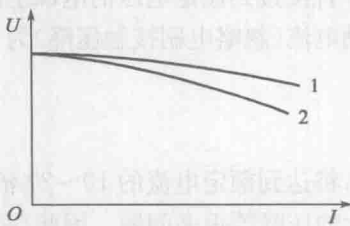


图 1-9 他励、并励发电机的外特性曲线

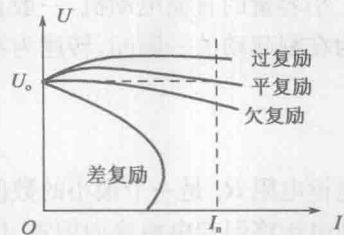


图 1-10 复励发电机的外特性曲线

串励与并励磁场方向相反的复励发电机称为差复励发电机,当负载电流较大时它的端电压随负载电流的增加而急剧下降。这种发电机一般是作为特殊用途的专用电源,例如直流电焊发电机,船舶电动舵机、某种起货机的专用电源发电机。

2. 直流电动机的运行特性

直流电动机接直流电源,输入电功率,轴上输出机械功率。图 1-11 中 a)、b)、c) 分别为并励、串励和复励电动机的接线图。由于他励和并励电动机的励磁电路都是接到外电源上,励磁电流不受电枢电流变化的影响。因此,他励和并励电动机的特性基本相同。图中 R 表示可能串入电枢电路的起动或调速用的电阻; R_f' 表示调节励磁电流的外串电阻。由图示电路可知,当电动机稳定运行时电枢电路的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a(R_a + R) \quad (1-7)$$

并励和复励电动机的输入线路电流 I 与电枢电流 I_a 、励磁电流 I_f 的关系分别为

$$\begin{cases} I = I_a + I_f \\ I_f = U/R_f \end{cases} \quad (1-8)$$

式中: R_f ——并励电路的总电阻。

当励磁电流比负载电流小得多时,常可忽略,这时可认为 $I \approx I_a$ 。直流电动机产生的电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 和空载转矩 T_0 相平衡,即: $T = T_L + T_0$ 。

1) 直流电动机的起动

一台电动机要带动生产机械工作,首先要接上电源从静止状态转动起来到达稳态运行,这就是电动机的起动过程。对于电动机的起动要求,主要有两条:一是起动转矩要足够大,要能够克服起动时的摩擦转矩和负载转矩,否则电动机就转不起来;二是起动电流不要太大,因起

动电流太大会对电源及电机产生有害的影响。

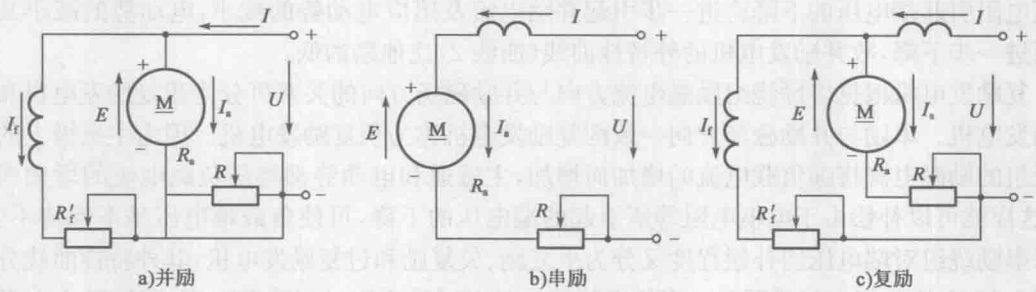


图 1-11 直流电动机的接线图

除了小容量的直流电动机,一般直流电动机是不允许直接接到额定电压的电源上起动的。这是因为在刚起动的一瞬间,转速为零,反电势为零,起动电流(忽略电刷接触压降)为

$$I_a = \frac{U}{R_a} \quad (1-9)$$

而电枢电阻 R_a 是一个很小的数值,故起动电流很大,将达到额定电流的 10~20 倍。这样大的起动电流将引起电机换向困难,供电线路上产生很大的压降等很多问题。因此,必须采用一些适当的方法来起动直流电动机。直流电动机的常用起动方法有电枢回路串电阻起动及降压起动。例如,图 1-11a) 并励电动机的电枢回路串电阻起动,就是在电枢回路串入电阻 R ,电动机接到电源后,起动电流为

$$I_a = \frac{U}{R_a + R} \quad (1-10)$$

可见这时起动电流将减小,串的电阻越大,起动电流越小。当起动转矩大于负载转矩,电动机开始转动后 $E \neq 0$, 则

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R} \quad (1-11)$$

随着转速升高,反电势 E 不断增大,起动电流逐步减小,起动转矩也逐步减小,为了在整个起动过程中保持一定的起动转矩,加速电动机起动过程,可以将起动电阻一段一段地逐步切除,最后电动机进入稳态运行。在电动机完成起动过程后,因起动电阻继续接在电枢回路中要消耗电能,起动完成后应将电阻全部切除。

2) 直流电动机的机械特性

电动机的转速与转矩之间的关系 $n = f(T)$ 称为机械特性,它表明了直流电动机在一定的条件下,转速与电磁转矩两个机械量之间的对应关系。直流电动机的机械特性是根据电动机的三个基本关系式推导出来的,即: $U = E + I_a(R_a + R)$, $E = K_e \Phi n$, $T = K_T \Phi I_a$ 。

先将反电势 $E = K_e \Phi n$ 代入 $U = E + I_a(R_a + R)$ 的电压方程中,并当电枢电路的外串电阻 $R = 0$ 时,可得直流电动机的转速特性 $n = f(I_a)$ 的表示式,即

$$n = \frac{U - I_a R_a}{K_e \Phi} \quad (1-12)$$

当直流电动机空载运行时,电动机只产生很小的电磁转矩以克服空载转矩;当轴上加上负

载转矩时,首先引起电动机转速 n 和相应的反电动势 E 的下降,从而引起电枢电流 I_a 和电磁转矩 $T=K_T\Phi I$ 的增加。当转矩达到新的平衡时,电动机将在较低的转速下稳定运行。可见直流电动机的转速随负载而变。

若将 $I_a=T/(K_T\Phi)$ 代入上式(1-12)中,则得到自然机械特性关系式(或称为固有机电特性,此时端电压等于额定电压,磁通等于额定磁通,电枢回路未串接任何电阻),即

$$n = \frac{U}{K_e\Phi} - \frac{R_a}{K_eK_T\Phi^2}T = n_0 - kT \quad (1-13)$$

式中,当转矩 $T=0$ 时的转速 $n_0=U/K_e\Phi$ 称为理想空载转速;系数 $k=R_a/K_eK_T\Phi^2$ 表明特性曲线的斜率。当电枢的外串电阻 $R \neq 0$ 时,斜率 k 变大,这时的机械特性称为人为机械特性。直流电动机的机械特性与励磁方式有关。

(1)并(他)励电动机:由于每极磁通,理想空载转速和系数 k 均为常数,故转速 n 随转矩的增加而降低,如图 1-12 所示;但由于电枢电阻很小,转速随负载的变化不大,其转速变化率仅为 $3\% \sim 8\%$,故为硬机械特性。适于拖动要求恒转速的生产机械。

(2)串励电动机:由于串励磁通随负载的增加而增加,从而使转速随负载的增加而迅速下降,如图 1-12 所示。可以看出,该特性曲线的特点是:空载转速非常高,机械特性比较软。因此,当负载转矩较小时,转速将很高,甚至会超出最高限度的数值,导致电动机机械结构的损坏。所以,串励直流电动机绝对不允许空载起动及空载运行。它为软特性,起动力矩比较大,适用于起动困难的场合。

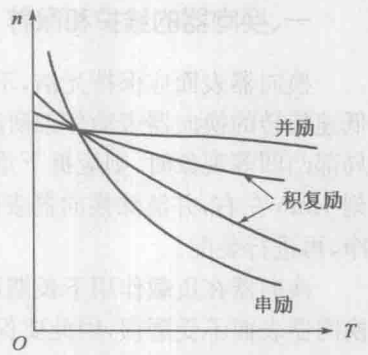


图 1-12 直流电动机的机械特性

(3)复励电动机:复励电动机的励磁绕组既有并励绕组,又有串励绕组,一般复励电动机均为积复励,即串励绕组的磁势和并励绕组的磁势方向相同。积复励电动机的机械特性介于并励和串励电动机之间。

3) 改变直流电动机转向的方法

要改变电动机的转向,需改变电动机电磁转矩的方向。根据左手定则,电动机的转动方向决定于磁场和电枢电流两者的方向。因此,使电动机反转的方法有:①改变励磁电流的方向,而电枢电流的方向不变;②改变电枢电流的方向,而励磁电流的方向不变。如果是并励或者他励电动机,只需将励磁绕组的两引出线对调,或者将电枢绕组的两引出线对调,即可改变电动机的转向。

4) 直流电动机的调速

直流电动机调速可以有三种方法:改变电动机两端的电压,改变磁通量,串调节电阻。

(1)改变电压调速是常用方法,如脉冲控制 PWM 方法,输入变化的不同占空量的方波,改变输入直流电动机两端的电压,以改变直流电动机转速,实现调速功能,可以实现无级调速,属于恒转矩调速。这种调速的问题在于一般只能在额定转速以下调节。

(2)改变磁通量,通过弱磁进行调速,可实现无级调速,缺点是只能实现在额定转速以上调节,属于恒功率调速。