

直 流 电 机



主编单位:

上海直流电机厂

编写单位:

哈尔滨电机厂

上海电机厂

上海交通大学

上海机械学院

上海汽车电机厂

上海电器科学研究所

包头电机厂

目 录

2k652/1103

第1章 概 述

1 用途和分类	21-1
2 结构概况	21-1
3 功率、电压和转速等级	21-4
3.1 功率等级	21-4
3.2 电压等级	21-5
3.3 转速等级	21-5
4 直流电机转矩与重量的关系	21-5

第2章 工作原理

1 基本工作原理	21-6
1.1 电枢电动势	21-6
1.2 电磁转矩	21-6
1.3 电压、转矩和功率平衡	21-7
2 电枢反应	21-7
2.1 交轴电枢反应	21-8
2.2 直轴电枢反应	21-8
3 运行特性	21-9
3.1 直流发电机的主要工作特性	21-9
3.2 直流电动机的主要工作特性	21-12
3.3 直流电动机稳定运行的条件	21-12
3.4 直流电动机的起动	21-12
3.5 直流电动机的调速	21-13
3.6 直流电动机的制动	21-13
3.7 直流发电机的并联运行	21-13
3.8 直流电动机的同轴运行	21-15

第3章 电枢绕组

1 一般特征	21-16
1.1 绕组构成	21-16
1.2 绕组节距	21-16
2 绕组分类、主要特点和应用范围	21-17
2.1 叠绕组、波绕组和蛙绕组	21-17
2.2 特殊绕组	21-17
3 绕组对称条件	21-17

3.1 电动势多边形图	21-17
3.2 对称条件	21-22
4 均压连接	21-23
4.1 均压线	21-23
4.2 均压线的连接	21-24
4.3 均压线结构	21-24

第4章 换 向

1 换向过程的基本概念	21-26
1.1 换向元件中的电动势	21-27
1.2 换向元件中的电流	21-27
1.3 电抗电动势和换向区计算	21-28
2 改善换向的方法	21-30
2.1 换向极	21-30
2.2 补偿绕组	21-31
2.3 电刷与滑动接触	21-32
2.4 叠片机座与电感分路	21-32
2.5 移刷	21-32
3 环火	21-33
3.1 产生环火的原因	21-33
3.2 防止环火的措施	21-34

第5章 电磁设计

1 电磁设计的依据和任务	21-35
2 主要尺寸和极数的选择	21-35
2.1 主要尺寸的确定	21-35
2.2 极弧系数 α_p 与电磁负载 A 及 B_p 的选择	21-37
2.3 极数的选择	21-38
3 电枢设计	21-39
3.1 电枢绕组、槽数和槽形	21-39
3.2 换向器的主要尺寸与电刷的选择	21-41
4 磁路计算	21-43
4.1 直流电机的磁路与主极漏磁系数	21-43
4.2 气隙	21-43
4.3 电枢齿部	21-45

4.4	电枢轭部	21-45
4.5	主极	21-45
4.6	定子轭部	21-46
4.7	磁路各部分磁通密度的选择	21-46
4.8	空载特性计算	21-46
4.9	电枢反应去磁磁动势计算	21-49
4.10	励磁绕组	21-49
5	换向设计计算	21-50
5.1	换向器片间电压	21-50
5.2	补偿绕组	21-50
5.3	换向极计算	21-51
6	损耗和效率	21-53
6.1	铜耗	21-53
6.2	铁耗	21-54
6.3	电刷接触耗	21-54
6.4	机械损耗	21-54
6.5	杂散损耗	21-54
6.6	总损耗和效率	21-55
7	直流电机工作特性计算	21-55
7.1	电压变化率计算	21-55
7.2	转速变化率计算	21-55
7.3	直流电动机工作特性计算	21-55
8	发热和通风冷却	21-55
8.1	热平衡方程和发热曲线	21-56
8.2	热的传导和表面散热	21-57
8.3	温升计算	21-57
8.4	通风冷却	21-57

第6章 整流电源供电时

直流电动机的运行

1	脉动电流	21-58
2	整流电源供电时电动机的发热	21-59
3	整流电源供电时电动机的换向	21-59
3.1	脉动电流对电动机换向性能的影响	21-59
3.2	动态过程中的换向	21-61
3.3	改善换向的方法	21-62
4	整流电源供电时电动机的轴电压	21-62
5	整流电源供电时电动机的振动和噪声	21-62

6	整流电源供电时电动机的绕组绝缘	21-62
7	绕组电感的计算和测量	21-63
7.1	电枢回路电感的计算和测量	21-63
7.2	励磁绕组电感的计算和测量	21-63
8	电动机额定电压与整流电源输出电压的匹配	21-64

第7章 结构与制造工艺

1	结构型式	21-64
1.1	防护结构和安装结构型式	21-66
1.2	通风冷却方式和通风结构	21-66
2	结构组成	21-66
3	定子	21-70
3.1	定子结构	21-70
3.2	机座	21-70
3.3	主极	21-72
3.4	换向极	21-72
3.5	补偿绕组	21-72
3.6	定子引线电缆	21-74
4	电枢	21-74
4.1	轴	21-75
4.2	电枢铁心	21-77
4.3	电枢支架	21-77
4.4	电枢绕组	21-77
5	换向器	21-79
5.1	换向器的结构型式、特点和用途	21-79
5.2	换向器的主要尺寸确定	21-79
5.3	换向器的机械计算	21-82
5.4	换向片	21-85
5.5	升高片及其固定	21-85
5.6	换向器的常用绝缘材料	21-87
6	电刷装置	21-87
6.1	电刷装置结构的基本要求	21-87
6.2	刷握结构型式、特点和适用范围	21-89
7	轴承	21-89
8	直流电机主要零部件的公差和配合	21-89
9	制造工艺	21-89
9.1	铁心装压	21-90

9.2 电枢绕组嵌线	21-93
9.3 绕组焊接工艺	21-93
9.4 电枢绕组端部的固紧	21-93
9.5 换向器制造	21-95
9.6 总装配工艺	21-98

第 8 章 绝 缘

1 直流电机绝缘结构的基本要求	21-99
2 绝缘材料和电磁线的选择	21-99
3 电枢绝缘结构	21-99
3.1 电枢线圈、槽部绝缘结构	21-99
3.2 电枢绕组端部绝缘结构	21-101
3.3 换向器绝缘结构	21-101
4 定子绝缘结构	21-101
4.1 主极绝缘结构	21-103
4.2 换向极绝缘结构	21-103
4.3 补偿绕组绝缘结构	21-104
5 直流电机的绝缘处理	21-104
5.1 浸渍漆的选用	21-104
5.2 电枢浸漆方法	21-104
6 线圈绝缘强度的检查试验	21-106

第 9 章 试 验

1 试验项目	21-107
2 电刷中性位置的确定	21-107
3 绕组绝缘电阻测定和绝缘强度试验	21-108
4 绕组电阻测量	21-109
5 空载特性的测定	21-109
6 空载损耗的测定	21-109
6.1 空载电动机法	21-109
6.2 空载发电机法	21-110
7 温升试验	21-110
8 负载试验	21-111
8.1 负载电阻法	21-111
8.2 回馈法	21-111
8.3 被试电机与陪试电机的关系	21-111
8.4 短路法	21-111
9 换向检查及无火花换向区试验	21-111
9.1 换向检查及试验	21-111

9.2 换向判断和调整	21-113
10 转动惯量的测定	21-113
10.1 扭转摆动法	21-113
10.2 重物自由降落法	21-115
10.3 自由停机法	21-115

第 10 章 安装与维护

1 电机安装前的准备	21-116
1.1 设备的验收和保管	21-116
1.2 确定电机的主纵轴线和主横轴线	21-116
1.3 基础的验收	21-116
2 底板和轴承座的安装	21-116
2.1 底板安装要点	21-116
2.2 轴承座安装要点	21-117
3 定子和电枢的装配	21-117
3.1 联轴器与电枢轴的套装要点	21-117
3.2 定子和电枢装配方法	21-118
4 机组轴线的调整	21-118
4.1 轴线定心要点	21-120
4.2 轴线定心允许偏差和调整	21-120
5 轴承装配	21-121
5.1 滑动轴承各部分间隙的测量与调整	21-121
5.2 轴瓦研刮要点	21-122
6 电机干燥	21-122
6.1 外加热源干燥	21-122
6.2 通电干燥	21-122
7 电机的试车	21-125
7.1 试车前准备工作	21-125
7.2 起动和停机	21-125
8 电机的维护与常见故障	21-125
8.1 电机的维护	21-125
8.2 常见故障与排除措施	21-126
8.3 电枢绕组故障的检查方法	21-126

第 11 章 派生及专用电机

1 起重冶金用直流电动机	21-130
1.1 用途和特点	21-130
1.2 设计要点	21-131
1.3 不同负载持续率时的输出功率	21-131
1.4 升速时的过载能力	21-132

2 汽车电机	21-132	7.1 特点和用途	21-138
2.1 用途和特点	21-132	7.2 工作原理	21-138
2.2 结构和设计要点	21-132	7.3 误差分析	21-139
3 船用直流电机	21-133	8 充电用直流发电机	21-139
3.1 用途和分类	21-133	8.1 特点和用途	21-139
3.2 技术要求与措施	21-133	8.2 设计要点	21-139
4 蓄电池供电直流牵引电动机	21-134	9 直流牵引电动机	21-140
4.1 用途和特点	21-134	10 直流测速发电机	21-140
4.2 变速方法及运行特点	21-135	11 电机扩大机	21-140
5 励磁机	21-135	12 永磁直流电动机	21-140
5.1 用途和特点	21-135	13 直流力矩电动机	21-140
5.2 设计特点	21-136	14 直流电焊机	21-140
5.3 结构特点	21-136		
6 无槽直流电动机	21-137		
6.1 特点和用途	21-137		
6.2 电枢绕组布线与绝缘	21-137		
6.3 涡流损耗	21-137		
7 直流测功机	21-138		

附 录

附录 I 小型直流电动机技术数据表	21-141
附录 II 中、大型直流电机技术数据表	21-142

参考文献

第1章 概 述

1 用途和分类

直流电机是将直流电能和机械能相互转换的旋转电机。它可用作电动机或发电机,还可以作其它特殊的用途。

直流电动机具有:(1)优良的调速特性,调速平滑、方便,调速范围 Θ 宽广。(2)过载能力 Θ 大,能承受频繁的冲击负载。(3)可实现频繁的无级快速启动、制动和反转。(4)能满足生产过程自动化系统各种不同的特殊运行要求等特点。其制造成本和维护工作量一般来说虽比交流电动机的大,但交流电动机的调速性能至今还不能与直流电动机的相比,因而直流电动机在需要宽广调速的场合和要求有特殊运行性能的自动控制系统中,一直占有突出的地位,被广泛应用于冶金矿山、交通运输、纺织印染、造纸印刷以及化工和机床等工业。

直流发电机能提供无脉动的电力,其输出电压便于精确地调节和控制,它的主要用途之一是作为某些重要的直流电动机的电源,使其获得较好的换向性能。它还能满足直流和同步电机励磁系统的不同要求,并可用于电化工业中作为电解、电镀的低电压大电流直流电源。随着可控硅整流电源的广泛应用和日益完善,及其在技术和经济上的显著优点,一方面在许多领域中取代了直流发电机,另一方面却进一步扩大了直流电动机的应用范围。但直流发电机在某些领域中如真空冶炼工业和无交流电网且又需要直流电源的场合等,仍有它一定的重要性。

直流电机的特性与其励磁方式有密切联系,按不同的励磁方式,它可分为永磁、并励、串励、复励、稳定并励和他励直流电机六种。不同励磁方式的直流电动机与直流发电机的特性和用途分别见表21.1-1和表21.1-2。直流电机还可以分别按转速、电流、电压、工作定额以及按防护型式、安装结构型式和通风冷却方式等特征来分类。直流电机的派生和专用系列则是按用途分类,如表21.1-3所示。

随着国民经济和国防建设的发展,工业生产自动化程度的不断提高,对直流电动机的动态特性、调速范围、运行可靠性和主要技术经济指标提出了更

高的要求。在某些电力传动系统中要求进一步提高大型直流电机的单机功率,发展更多特种用途的专用直流电机。为此,必须积极开展对直流电机换向理论、通风散热、振动噪声和测试技术等方面的理论研究,扩大电子计算技术在设计、制造和科研上的应用,以便多快好省地发展直流电机,适应四个现代化的需要。

2 结构概况

防滴型卧式自扇冷直流电机是中小型直流电机中应用面最广的一种结构型式,它的结构概况见图21.1-1和表21.1-4。为了适应功率大小、运行特性、通风冷却方式和使用环境条件等的不同要求,大、中、小型直流电机的某些零部件的结构有一定的差别。结构设计的质量对提高运行可靠性、节约原材料、提高劳动生产率和便于使用与维护有直接影响。

直流电机的某些结构零部件在运行时要承受相当大的电磁力、机械应力和热负载的综合作用,尤其是组成直流电机电枢的各零部件,除必须有足够的机械强度外,电枢绕组绝缘还应有良好的介电性能、耐热和耐潮性能,能防止碳粉积附的影响,换向器和电刷应能保持良好的滑动接触。直流电机的通风冷却,关系到散热效果以及材料的充分利用和电机的使用寿命。电枢是直流电机损耗发热比较集中、散热比较困难的部件,所以通风冷却系统以及电枢的通风结构的合理布置也是结构设计的重要环节。

改进直流电机结构,不仅决定于电磁与结构设计工作水平的提高,而且还取决于新材料、新工艺和新技术的应用和推广以及系列化、通用化、标准化工作的发展。使其有利于实现机械化、自动化生产,以提高生产效率和产品质量,节约原材料,降低制造成

① 调速范围常用直流电动机最低转速与最高转速之比来表示。一般可达1:200;高精度伺服电动机的调速范围可达1:10000及以上。

② 短时过载转矩一般中大型轧钢直流电动机可以达到额定转矩的2.5倍及以上,特殊要求的可以达到10倍。并能在低速下连续输出较大转矩。

表 21.1-1 直流电动机的特性和用途

励磁方式	永磁	他励	并励	稳定并励②	复励	串励
励磁特征图						
起动转矩	起动转矩约为额定转矩的2倍,也可制成额定转矩的4~5倍	由于起动电流一般限制在额定电流的2.5倍以内,起动转矩约为额定转矩的2~2.5倍	一般为额定转矩的1.5倍。带补偿绕组时,可达额定转矩的2.5~2.8倍		起动转矩较大,约可达额定转矩的4倍,由复励程度决定	起动转矩很大,约可达额定转矩的5倍
短时过载转矩	一般为额定转矩的1.5倍,也可制成额定转矩的3.5~4倍					可达额定转矩的4倍左右
转速变化率	3~15%		5~20%		由复励程度来决定,可达25~30%	转速变化率很大,空载转速极高
调速范围	转速①与电枢电压是线性关系,有较好的调速特性,调速范围较大	削弱磁场恒功率调速,转速比可达1:2至1:4,特殊设计可达1:8,他励时,可调节电枢电压,恒转矩向下调速,范围较宽广			削弱磁场调速,可达额定转速的2倍	用外接电阻与串励绕组串联或并联;或将串励绕组串联或并联连接来实现调速,调速范围较宽
用途	自动控制系统中作为执行元件及一般传动动力用,如力矩电动机	用于起动转矩稍大的恒速负载,和要求调速的传动系统,如离心泵、风机、金属切削机床、纺织印染、造纸和印刷机械等			用于要求起动转矩较大,转速变化不大的负载,如拖动空气压缩机、冶金辅助传动机械等	用于要求很大的起动转矩、转速允许有较大变化的负载,如蓄电池供电电车、起货机、起锚机、电车、电力传动机车等

- ① 直流电动机从实际冷却状态下开始运转,到绕组为工作温度时,由于温度变化引起了磁通变化和电枢电阻压降的变化,因此产生直流电动机的转速变化一般约为15~20%。而永磁直流电动机的磁通与温度无关,仅电枢电阻压降随温度变化,所以由于温度变化而产生的转速变化约为1~2%。
- ② 稳定并励直流电动机的主极励磁绕组由并励绕组和稳定绕组组成。稳定绕组实质上是少量匝数的串励绕组。在并励或他励电动机中采用稳定绕组的目的,在于使转速不致于随负载增加而上升,而是略为降低,亦即使电动机运行稳定。

表 21.1-2 直流发电机的特性和用途

励磁方式	电压变化率		特 性	用 途
永 磁	1~10%		输出端电压与转速成线性关系	用作测速发电机
他 励	5~10%		输出端电压随负载电流增加而降低，能调节励磁电流使输出端电压有较大幅度的变化	常用于电动机-发电机-电动机系统中，实现直流电动机的恒转矩宽广调速
并 励	20~40%		输出端电压随负载电流增加而降低，降低的幅度较他励时为大，其外特性稍软	充电、电镀、电解、冶炼等用直流电源
复 励 ^①	积复励	不超过 6%	输出端电压在负载变动时变化较小。电压变化率由复励程度即串、并励的安匝比决定	直流电源，如起重轮胎吊和用柴油发动机带动的独立电源等
	差复励	电压变化率较大	输出端电压随负载电流增加而迅速下降，甚至降为零	如用于自动控制系统中作为执行直流电动机的电源
串 励	—		有负载时，发电机才能输出端电压，输出电压随负载电流增大而上升	用作升压机

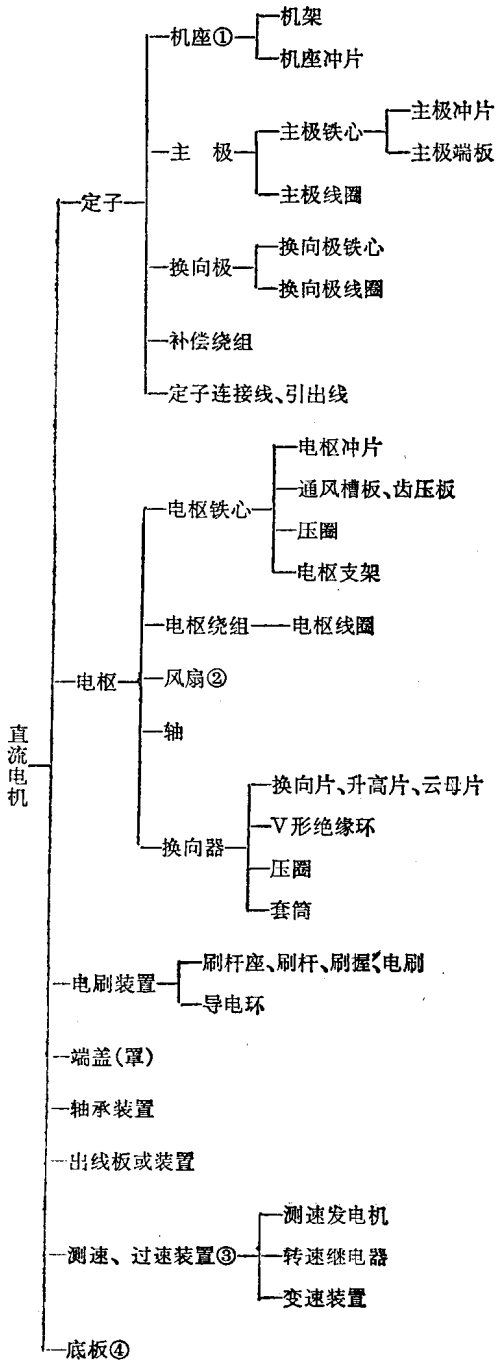
① 串励绕组和并励绕组的极性同向的，称积复励；极性反向的，称差复励，通常所称复励直流电机是指积复励。在复励直流发电机中，串励绕组使其空载电压和额定电压相等的，称为平复励；使其空载电压低于额定电压的，称为过复励；使其空载电压高于额定电压的，称为欠复励。根据串励绕组在电机接线中连接情况，复励直流电机接线有短复励和长复励之分。

表 21.1-3 直流电机及其派生、专用产品的用途和分类

序 号	产 品 名 称	主 要 用 途	型号 ^①	原 用 型 号
1	直流电动机	一般用途，基本系列	Z	Z、ZD、ZJD
2	直流发电机	一般用途，基本系列	ZF	Z、ZF、ZJF
3	广调速直流电动机	用于恒功率调速范围较大的传动机械	ZT	ZT
4	冶金起重直流电动机	冶金辅助传动机械等用	ZZJ	ZZ、ZZK、ZZY
5	直流牵引电动机	电力传动机车、工矿电机车和蓄电池供电电车等用	ZQ	ZQ
6	船用直流电动机	船舶上各种辅助机械用	Z-H	Z ₂ C、ZH
7	船用直流发电机	作船舶上电源用	ZF-H	Z ₂ C、ZH
8	精密机床用直流电动机	磨床、坐标镗床等精密机床用	ZJ	ZJD
9	汽车起动机	汽车、拖拉机、内燃机等用	ST	ST
10	汽车发电机	汽车、拖拉机、内燃机等用	F	F
11	挖掘机用直流电动机	冶金矿山挖掘机用	ZKJ	ZZC
12	龙门刨床用直流电动机	龙门刨床用	ZU	ZBD
13	防爆安全型直流电动机	矿井和有易爆气体的场所用	ZA	Z
14	无槽直流电动机	快速动作伺服系统中用	ZW	ZWC
15	力矩直流电动机	用于位置或速度伺服系统中作为执行元件	ZLJ	
16	直流测功机	测定原动机效率和输出功率用	CZ	ZC

① 参见第一机械工业部标准《电机产品型号》

表 21-1-4 直流电机的主要结构件



- ① 叠片机座时
- ② 外通风及大型直流电机一般不带风扇
- ③ 按使用要求装设
- ④ 大型和部分中型直流电机有底板

本。如为了进一步提高直流电动机的动态特性和技术经济指标,应积极推广采用 F 级、H 级绝缘材料,使电机在保证电机性能要求的基础上,能加大电机电枢铁心长度与直径的比值,进一步缩小电枢直径,减小转动惯量。大型直流电动机还要特别注意发展有利于改善换向性能和降低转动惯量的新型电枢结构。

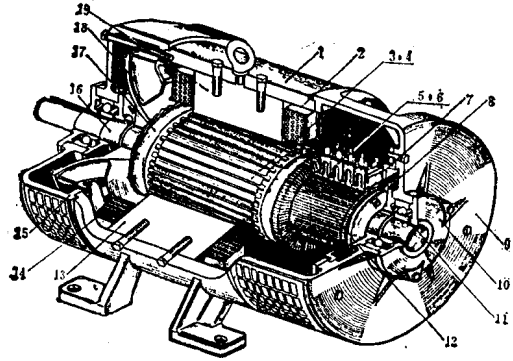


图 21-1-1 防滴型卧式自扇冷直流电机

- 1—机座 2—主极励磁绕组 3—电枢铁心 4—电枢绕组 5—刷握 6—电刷 7—刷杆 8—平衡环 9—后端盖 10—轴承盖 11—轴承 12—换向器 13—换向极铁心 14—换向极绕组 15—前端盖 16—轴 17—电枢绕组端部绑扎 18—风扇 19—主极铁心

3 功率、电压和转速等级

直流电机在规定的使用环境和运行条件下,主要技术数据有:额定功率、额定电压、额定转速、额定电流、励磁方式和励磁电压等。

直流电机额定功率和额定转速的比值相当于电机的转矩,电机转矩的大小决定了电机的几何尺寸。所以,通常以额定功率和额定转速来划分直流电机的大小:1500 转/分、功率为 200 千瓦及以下的称为小型直流电动机;1500 转/分、功率为 200 千瓦以上到 1000 转/分、功率为 1250 千瓦及以下的称为中型直流电动机;1000 转/分及以下、功率为 1250 千瓦以上的称为大型直流电动机。直流电机的额定功率、额定电压和额定转速都有规定的标准等级。

3.1 功率等级

直流电机采用的额定功率等级见表 21-1-5。直流电动机采用硬性功率等级,即同一功率数值应用于不同的额定转速。功率在 100 千瓦以下基本上

按比值1.35递增的;100千瓦到1600千瓦是按R10数系递增的。直流发电机的额定功率等级是从电动机-发电机-电动机控制系统考虑确定的,在1450千瓦以下的直流发电机,它的额定功率与交流异步电动机的功率相匹配;在1450千瓦以上的则与供电给传动直流电动机的功率相匹配。

表 21.1-5 直流电机的功率等级 kW

直流电动机							
0.37	0.55	0.75	1.1	1.5	2.2	3	4
5.5	7.5	10	13	17	22	30	40
55	75	100	125	160	200	250	320
400	500	630	800	1000	1250	1600	2050
2600	3300	4300	5350	6700			
直流发电机							
0.7	1.0	1.4	1.9	2.5	3.5	4.8	6.5
9	11.5	14	19	26	35	48	67
90	115	145	185	240	300	370	470
580	730	920	1150	1450	1900	2400	3000
3600	4600	5700	7000				

3.2 电压等级

直流电机的额定电压等级见表21.1-6。一般用途基本系列直流发电机的额定电压在115伏以上。

表 21.1-6 直流电机的电压等级 V

直流电动机							
110	160	220	(330)	440	630 (660)	800	1000
直流发电机							
6	12	24	36	48	72	115	230
(330)	460	630 (660)	800	1000			

注 表中有括号的电压不常使用。

3.3 转速等级

直流电机的转速等级见表21.1-7。直流电动机的转速等级,500转/分及以上按同步转速等级;500转/分以下按R10数系分级。直流发电机按同步转速分级,也可用与表列转速相应的异步电动机转速。

表 21.1-7 直流电机的转速等级 r/min

直流电动机							
3000	1500	1000	750	600	500	400	320
250	200	160	125	100	80	63	50
40	32	25					
直流发电机							
3000	1500	1000	750	600	500	427	375
333	300						

4 直流电机转矩与重量的关系

200千瓦以下定子用铝线的系列,小型直流电机转矩与重量的关系近似曲线见图21.1-2。

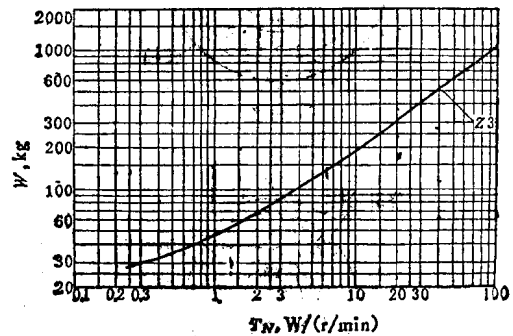


图 21.1-2 200千瓦以下小型直流电机转矩与重量关系近似曲线

第2章 工作原理

1 基本工作原理

直流电机是借换向器和电刷以实现外电路的直流电与电枢绕组中交流电之间相互变换并同时借静止气隙磁场以实现电枢绕组中交流电与转轴上机械转矩之间相互变换的电机。直流电机的定子磁轭、主极铁心、气隙和电枢铁心构成磁路，如图 21.2-1a 所示。励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势在气隙内形成气隙磁场。电枢绕组相对气隙磁场旋转感生电枢电动势；载流电枢绕组与气隙磁场相互作用产生电磁转矩。机械功率和电功率分别通过转轴和电刷输入或输出，从而实现机电能量转换。

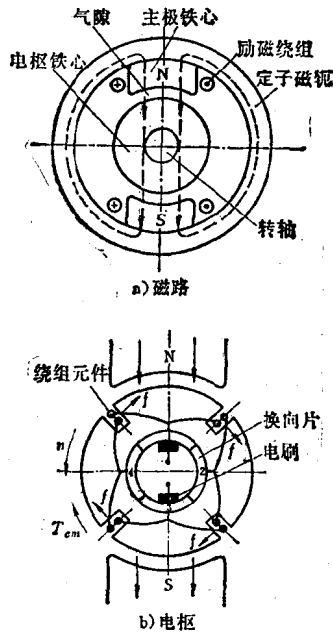


图 21.2-1 直流发电机的磁路与电枢示意图

1.1 电枢电动势

电枢绕组是由绕组元件按一定规律和换向片连接而成，如图 21.2-1b 所示。电枢旋转时，根据电磁感应定律 $e = Blv$ ，绕组各个元件边相对气隙磁场运动而感应出电动势，元件电动势即为其两个元件边

的电动势之和。电枢电动势为电枢绕组正负极性电刷之间任一并联支路内各串联元件电动势的总和。

元件交替通过不同极性磁场所感应的电动势为交变电动势；但由于电刷与换向片相对旋转而与主极相对静止，每条支路内各元件所处的磁场位置维持不变，因此通过电刷与换向片的及时换接，支路电动势（即电枢电动势）为直流电动势。为使支路电动势最大，被电刷所短接的元件的轴线应与主极中心线重合，即通常所称电刷应处于中性位置。

当电机的极对数为 p ，元件数为 S ，每个元件有 W_p 匝，绕组共有 a 对支路和导体 $N = 2SW_p$ 根，则在电刷处于中性位置时，其电枢电动势可按下式计算：

$$E_a = C_e \Phi n \quad (21.2-1)$$

式中 $C_e = \frac{pN}{60a}$ —— 电动势常数

Φ —— 每极气隙磁通 Wb

n —— 电枢转速 r/min

电枢电动势的极性根据磁场极性与旋转方向按右手定则决定，若二者只变其一，则电动势极性改变，若二者同时改变，则电动势极性不变。

1.2 电磁转矩

根据电磁力定律 $f = Bli$ ，处于气隙磁场中的载流电枢绕组的各个元件边都将受到切向电磁力的作用，如图 21.2-1b 所示。当电刷处于中性位置时，通过电刷的总电流为 I_a ，则电磁转矩可按下式计算：

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (21.2-2)$$

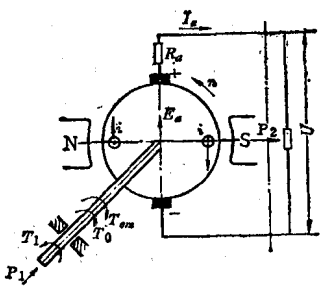
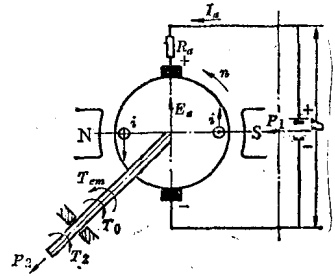
式中 $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ —— 转矩常数

有槽电枢的电磁力为齿部与绕组元件所受力之和，无槽电枢的电磁力全部作用在绕组元件上，两种电枢结构的电磁力作用部位虽有区别，但其电磁转矩相等，均可按式(21.2-2)计算。电磁转矩同时作用在电枢和主极上，其大小相等，方向相反。

$$\ominus 1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$$

$$\ominus 1 \text{ N} \cdot \text{m} = \frac{1}{9.81} \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

表 21.2-1 直流电机的电压、转矩和功率平衡

	发 电 机	电 动 机
工作原理	 <p>1 发电机由原动机拖动,以转速 n (角速度 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$) 旋转,原动机输入的转矩为 T_1,输入的机械功率为 $P_1 = T_1 \Omega$</p> <p>2 发电机旋转后,电枢绕组感生电动势 E_a,接入负载后,输出电流 I_a,发电机端电压为 U,发电机输出的电功率为 $P_2 = UI_a$</p> <p>3 发电机电磁转矩 T_{em} 与 n 方向相反,为反转矩。原动机用以克服反转矩所消耗的机械功率 $T_{em} \Omega$ 转换为电枢绕组所获得的电功率 $E_a I_a$, $P_{em} = T_{em} \Omega = E_a I_a$ 称为电磁功率</p>	 <p>1 电动机接至端电压为 U 的电源,通入电流 I_a,输入的电功率为 $P_1 = UI_a$</p> <p>2 电动机通以电流后,产生电磁转矩 T_{em},克服负载阻转矩 T_2,以转速 n (角速度 Ω) 旋转。电动机输出的机械功率为 $P_2 = T_2 \Omega$</p> <p>3 电动机感应电动势 E_a 与 I_a 方向相反,为反电动势。电源用以克服反电动势所消耗的电功率 $E_a I_a$ 转换为轴上获得的机械功率 $T_{em} \Omega$, $P_{em} = E_a I_a = T_{em} \Omega$ 称为电磁功率</p>
电压平衡方程式	$U = E_a - (I_a R_a + \Delta U_b)$	$U = E_a + (I_a R_a + \Delta U_b)$
转矩平衡方程式	$T_1 = T_{em} + T_0$	$T_2 = T_{em} - T_0$
功率平衡方程式	$P_1 = P_{em} + P_0$ $P_2 = P_{em} - P_a$ $P_1 = P_0 + P_a + P_2$	$P_1 = P_{em} + P_a$ $P_2 = P_{em} - P_0$ $P_1 = P_0 + P_a + P_2$

电枢上电磁转矩的方向根据磁场极性与电枢电流的方向按左手定则决定,二者只变其一,转矩方向改变;二者同时改变,转矩方向不变。

1.3 电压、转矩和功率平衡

直流电机的能量转换过程是可逆的,可作发电机运行,也可作电动机运行。

直流电机稳定运行时的电压、转矩和功率平衡如表 21.2-1 所示。

- 表中 R_a ——电机电枢回路电阻
 ΔU_b ——正负电刷的接触电阻压降
 T_0 ——涡流、磁滞与通风摩擦阻转矩,其作用方向与电机转向相反
 P_a ——电枢回路总损耗, $P_a = I_a^2 R_a + I_a \Delta U_b$
 P_0 ——涡流、磁滞与通风摩擦损耗, $P_0 = T_0 \Omega$

2 电枢反应

负载时,电枢绕组中的电流将产生电枢磁动势。电枢磁动势轴线所在的空间位置随电刷的位移而移动,其空间分布为三角形,实际上,电枢电流集中在槽内,其空间分布为阶梯形,如图 21.2-2 所示。气隙磁场将由励磁绕组和电枢绕组的合成磁动势所决定。电枢磁动势对气隙磁场的影响称为电枢反应。

- ⊖ 发电机作电动机使用时,为使转速能达到铭牌值,应当减少励磁电流或提高电源电压,且适当降低输出功率,使电枢电流不超过铭牌值;电动机作发电机使用时,为使电压能达到铭牌值,应当提高转速或增大励磁电流,但励磁绕组温升不应超过允许值。对于具有串励绕组的直流电机,在改变用途时,应将串励绕组出线调换改接。

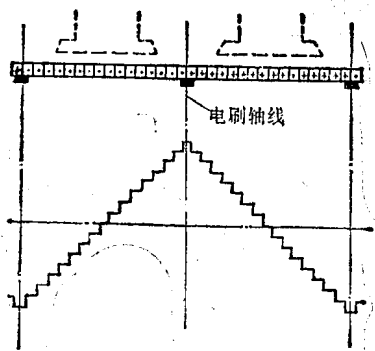


图 21-2-2 电枢磁动势的空间分布

电枢磁动势按其轴线所在空间位置和对气隙磁场影响的不同,有交轴电枢磁动势和直轴电枢磁动势之分。直轴与主极中心线重合,交轴与极间几何中心线重合,交轴与直轴间夹角为 90° 电角度。交轴和直轴电枢磁动势对气隙磁场的影响,分别称为交轴电枢反应和直轴电枢反应。

2.1 交轴电枢反应

当电刷处于几何中性线位置时,电枢磁动势的轴线在交轴上,如图 21-2-3 所示,电枢磁动势 F_a 全部为交轴电枢磁动势 F_{aq} ,即 $F_a = F_{aq}$ 。交轴电枢磁动

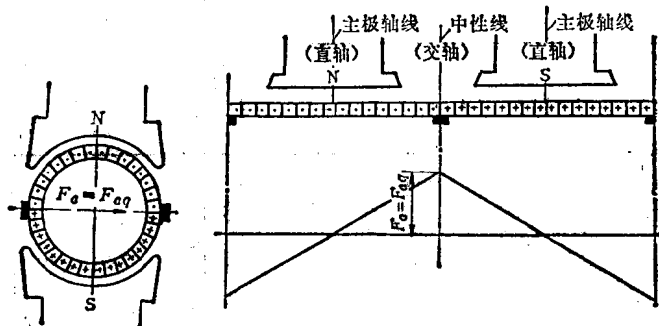


图 21-2-3 交轴电枢磁动势

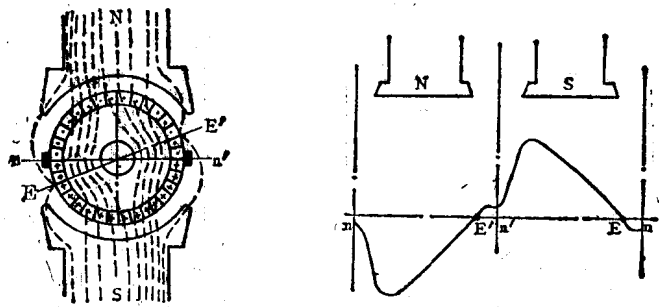


图 21-2-4 负载时的气隙磁密分布

势对气隙磁场的影响是:

(1) 使主极中心线一侧极靴下的磁场增强,另一侧减弱,从而使气隙磁场发生畸变,如图 21-2-4 所示。气隙磁场畸变后,气隙磁场的零点将从空载时的几何中性线 $n-n'$ 移至负载时的物理中性线 $E-E'$,并使同一主极下各个元件边的感应电动势不等,从而导致换向器片间电压分布不均。

(2) 在磁路不饱和的情况下,主极中心线一侧气隙磁通的增加量与另一侧的减小量相等,每极磁通与空载时仍相等,有效磁通不变。但当磁路饱和时,由于磁密增大的一侧其磁路饱和度提高,磁阻增大,因此主极中心线一侧气隙磁通的增加量将小于另一侧的减少量,从而使负载时每极磁通较空载时为小,呈现去磁效应。交轴电枢反应的去磁效应在发电机中将使电压降低;在电动机中将使转速升高。

交轴电枢反应所造成的不良后果可采用补偿绕组予以补偿,或采用偏心气隙,主极极靴削角等加以抑制,见第 4 章。

2.2 直轴电枢反应

当电刷偏离几何中性线 α 角时,电枢磁动势

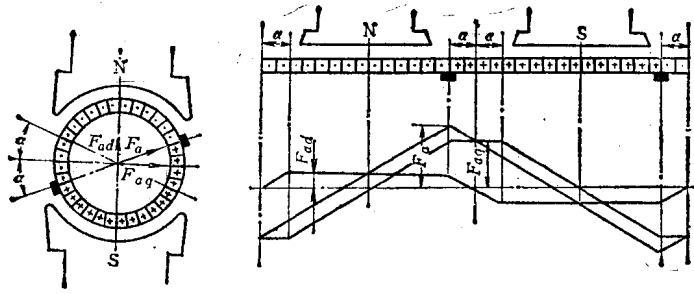


图 21-2-5 电枢磁动势的直轴与交轴分量

F_a 可分解为 F_{ad} 与 F_{aq} 两个分量如图 21-2-5 所示。分量 F_{ad} 由几何中性线两侧 2α 角范围内的安匝所产生，其轴线在直轴上，称为直轴电枢磁动势；其余部分则产生交轴电枢磁动势 F_{aq} 。直轴与交轴电枢磁动势在空间均按梯形规律分布。

直轴电枢磁动势不会造成气隙磁场的畸变，它对气隙磁场的影响是去磁或增磁，视电刷的位移方向和电机的工作状况而定，见下表：

	顺转向移刷	逆转向移刷
发电机	去磁	增磁
电动机	增磁	去磁

在直流电机中，有时适当少量移动电刷，利用其增磁或去磁效应以获得所要求的性能。

3 运行特性

3.1 直流发电机的主要工作特性

直流发电机的端电压 U ，电枢电流 I_a 和励磁电流 I_f 三者之间的关系，表征着它的工作特性。直流发电机经常是恒转速运行的，所以其工作特性都是以转速 n 为常数作基础。在这三个物理量中，最重要的是端电压。直流发电机的主要工作特性有空载特性、负载特性、外特性和调整特性等，其中以负载特性和外特性更为重要。不同励磁方式的直流发电机有不同的工作特性。他励、并励和复励直流发电机的工作特性见表 21-2-2。串励发电机中 $I_f = I_a = I$ ，其空载特性，负载特性曲线仅能按他励方式时才

表 21-2-2 直流发电机的主要工作特性

特性名称	特性类别	他励	并励	复励
空载特性				
调整特性			<ol style="list-style-type: none"> 1 剩磁电压 U_R 是自励发电机能够自励的必要条件。自励时剩磁电压所产生的励磁磁动势必须与剩磁的极性一致 2 空载特性曲线通过原点的切线，称励磁回路临界电阻线，励磁回路的电阻小于临界电阻 $R_{cr} = \text{tg } \theta_{cr}$，方能实现自励并稳定运行 	

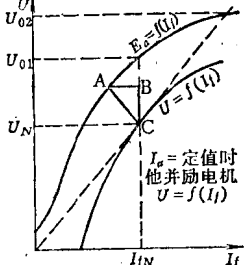
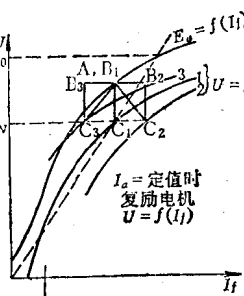
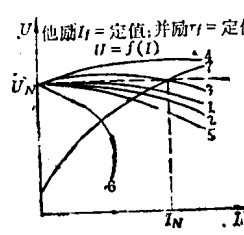
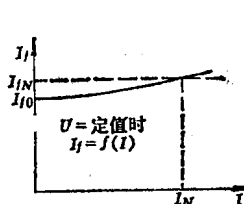
特性类别	他励	并励	复励
<p>负载特性</p>  <p>$I_a = \text{定值时}$ 他并励电机 $U = f(I_f)$</p>  <p>$I_a = \text{定值时}$ 复励电机 $U = f(I_f)$</p> <p>1 串励与电枢反应抵消时的负载特性 2 串励相对偏弱时的负载特性 3 串励相对偏强时的负载特性</p>	<p>负载特性表示电枢电流 I_a 不变时,端电压 U 随励磁电流 I_f 而变化的规律,可由空载特性和负载特性三角形 $\triangle ABC$ 绘出。$\triangle ABC$ 的大小决定于电枢电流 I_a 值, AB 边平行于 I_f 轴,表示电枢反应与串励效应之和; BC 边平行于 U 轴,表示电枢回路电阻压降。当 A 点在空载特性曲线上,则 O 点在负载特性曲线上。负载特性三角形是分析直流电机各种特性之间关系的一个有用工具。由负载特性可以确定运行时所需的励磁电流值</p> <p>$I_f = \text{定值}$ 的直线与空载特性和负载特性的交点,分别为励磁电流不变时的空载电压 U_{01} 及负载电压 U_N</p>	<p>并励回路电阻线与空载特性和负载特性的交点分别为并励回路电阻不变时的空载电压 U_{02} 及负载电压 U_N</p>	<p>U_0 及 U_N 的确定方法与并励电机相同。特性三角形 $\triangle ABC$ 边包括串励效应。当串励的增磁效应与电枢反应去磁效应抵消时,则 A, B_1 点重合,负载特性如曲线 1; 若串励相对偏弱,则 B_2 在 A 右侧,负载特性如曲线 2; 若串励相对偏强,则 B_3 在 A 左侧,负载特性如曲线 3</p>
<p>外特性</p>  <p>1—他励 2—并励 3—平复励 4—过复励 5—欠复励 6—差复励 7—串励</p>	<p>外特性表示励磁回路不作调节时端电压 U 随负载电流 I 而变化的规律,由外特性可以确定不同负载时的电压变化率</p> <p>负载电流增加时,电枢反应的去磁效应与电枢回路电阻压降相应增大,端电压随负载电流增加而降低</p>	<p>由于励磁回路电阻 R_f 不变;励磁电流将随端电压的降低而减小,因此随着负载电流的增加,其端电压的降低较他励电机为大,特性较他励电机稍软</p>	<p>负载电流增加时,其端电压的变化取决于串励绕组的接法和串、并励的安匝比。$U_N = U_0$ 为平复励; $U_N > U_0$ 为过复励; 欠复励时 $U_N < U_0$, 外特性比并励为软; 差复励时 U 随 I 的增加而迅速下降</p>
<p>调整特性</p>  <p>$U = \text{定值时}$ $I_f = f(I)$</p>	<p>1 负载电流 I 增加时,为保持端电压 U 不变,须相应增加励磁电流 I_f,以补偿电枢反应的去磁效应与电枢回路电压降</p> <p>2 调整特性曲线表示保持端电压 U 恒定所必须的励磁电流调节范围</p>		

表 21.2-3 直流电动机的主要工作特性

特性名称	特性类别	他、并励	串励	复励
转速特性	<p>转速特性曲线图，纵轴为转速 n，横轴为电枢电流 I_a。图中包含三条曲线：串励（最陡，下降最快）、复励（中间）、他并励（最平缓，接近水平）。标注了空载电流 I_0 和额定电流 I_N。</p>	<p>转速 $n = \frac{U - (I_a R_a + \Delta U_b)}{C_e \Phi}$。当 U 为常数，电枢电流 I_a 变化时，影响转速特性的因素是电枢回路电阻压降与气隙磁通的变化</p> <p>$I_f = \text{定值}$，气隙磁通 Φ 只受电枢反应的影响。I_a 增大时，电枢回路电阻压降使转速趋于下降，电枢反应去磁效应使转速趋于上升，因而转速变化较小，故有硬转速特性。通常电枢回路电阻压降影响较大，转速略为下倾。过载时，电枢反应影响增大，转速曲线上翘</p>	<p>$I_f = I_a$，气隙磁通 Φ 主要取决于负载电流的大小，转速随负载的增加而迅速下降，具有软的转速特性。轻载时，励磁电流很小，转速很高。因此，不容许空载运行</p>	<p>通常采用积复励接法，使运行稳定。并励绕组决定空载转速；串励绕组使它的转速特性较软，其转速特性介于并励与串励之间</p>
转矩特性	<p>转矩特性曲线图，纵轴为输出转矩 T_2，横轴为电枢电流 I_a。图中包含三条曲线：串励（最陡，向上）、复励（中间）、他并励（最平缓，接近直线）。标注了空载电流 I_0 和额定电流 I_N。</p>	<p>输出转矩 $T_2 = C_T \Phi I_a - T_0$。空载时，$I_a = I_0 = \frac{T_0}{C_T \Phi}$。负载时，$T_2$ 随 I_a 的增加而增加，并与 Φ 随 I_a 而变的情况有关</p> <p>$I_f = \text{定值}$，轻载时，转矩特性基本上是通过空载电流 I_0 点的直线；过载时，电枢反应的去磁作用增强，特性偏离直线，略为向下弯曲如左图</p>	<p>磁通随电流的增加而增大，电枢电流较小而磁路未饱和时，转矩按负载电流的平方关系增大；电枢电流增大时，由于磁路逐渐饱和，加之电枢反应的影响，转矩增大相对变慢</p>	<p>转矩特性取决于并励安匝与串励安匝之比，介于并励与串励电动机转矩特性之间</p>
机械特性	<p>机械特性曲线图，纵轴为转速 n，横轴为电磁转矩 T_{em}。图中包含三条曲线：串励（最陡，下降最快）、复励（中间）、他并励（最平缓，接近水平）。标注了空载电流 I_0 和额定电流 I_N。</p>	<p>从转速-转矩公式 $n = \frac{U - \Delta U_b}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em}$ 可见，机械特性具有与转速特性相似的形状。电枢回路串入外接电阻后，其外特性将变软</p>		
效率特性	<p>效率特性曲线图，纵轴为效率 η，横轴为电枢电流 I_a。图中显示效率随电流增加而迅速上升，达到峰值后略有下降。标注了空载电流 I_0 和额定电流 I_N。</p>	<p>效率 $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}$。总损耗 $\sum P$ 主要包括铜耗、铁耗和机械损耗等。空载时，$P_2 = 0$，电枢电流为空载电流 I_0，输入功率全部供给空载损耗，$\eta = 0$；负载时，当铜耗接近等于铁耗与机械损耗之和时，效率最高。对于经常工作于轻载状态下的电动机，一般应使铜耗大于铁耗与机械损耗之和；经常过载的电动机则应尽量减小铜耗</p>		