

高等职业教育“十五五”系列教材 汽车专业

新能源汽车动力电机及控制技术

主编 李步照 夏秋晖 肖淑梅



■ 双色印刷
■ 精品资源
■ 移动终端
■ 互动教学
■ 完美匹配
■ 即扫即看



以书会友



教学相长



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车动力电机及控制技术 / 李步照, 夏秋晖,
肖淑梅主编. — 南京: 南京大学出版社, 2025. 9.

ISBN 978-7-305-29382-5

I. U469.720.3

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 202588WK98 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

书 名 新能源汽车动力电机及控制技术
XINNENGYUAN QICHE DONGLI DIANJI JI KONGZHI JISHU

主 编 李步照 夏秋晖 肖淑梅
责任编辑 吴 华 编辑热线 025-83596997

照 排 南京开卷文化传媒有限公司
印 刷 南京新世纪联盟印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16 开 印张 13 字数 333 千
版 次 2025 年 9 月第 1 版 2025 年 9 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-29382-5
定 价 49.80 元

网 址: <http://www.njupco.com>
官方微博: <http://weibo.com/njupco>
微信服务号: NJUYUNSHU
销售咨询: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究
* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

前言

为了进一步深化职业教育改革,寻求汽车专业提升教学质量之“妙方”,编者经过多年摸索,解决了新能源汽车专业教学中不敢做、不能做、无法做的困扰。

本书借鉴了德国在新能源汽车方面先进的教学理念,按照“以行业需求为导向、以能力为本位、以学生为中心”的原则,设计模块化教学任务。以“做中学”为主导,将基础知识与技能有机结合,学生通过“如何做”,将必要知识点穿插于各个“做”的步骤中,边学习、边实践,在“做”中渗透理论的讲解,使学生乐学、好学。培养学生独立思考、将理论运用于实践的能力。培养学生探索精神、严谨的学习态度与耐心。通过小组互动培养学生与人交流、团队合作等职业素养。本书力求学生在“动中学、学中练、练中用”,解决新能源汽车专业教学中的难题。

本书结合国内外主流车型的动力电机及控制技术,分析其基本工作原理及结构,编写了动力电机及控制技术结构原理、新能源汽车电机控制技术、新能源汽车直流-直流转换器、能量回收系统四个模块;动力电机结构原理、电流与电压关系、脉冲宽度调制(PWM)、正半波与负半波生成、三相逆变器、直流-直流升压转换器、直流-直流降压转换器、能量再生过程等十四个任务;认识脉冲宽度调制(PWM)发生器信号形式、脉冲宽度调制(PWM)与电压关系、脉冲宽度调制(PWM)与正半波、交流电压生成、脉宽(PWM)调节控制的升压转换、脉宽(PWM)调节控制的降压转换、二极管单向导电特性验证、故障实验等二十四个技能训练。采用启发递进式方法,使学生完成相关知识、技术和技能提升。

本书在编写过程中,参考了网上大量专家学者的相关资料分享,借鉴了国内外专家学者的文献资料,也得到了行业内老师专家的指导与帮助。在此向他们表示真诚感谢!编写本书的目的,主要是分享传统汽车专业教师如何快速成长为新能源汽车专业教师的成长历程。

由于水平有限,书中难免有不妥和不足之处,殷切期望广大师生和读者批评指正。

编 者

2025 年 4 月

目 录

项目一 动力电机及控制技术结构原理	1
任务 1 动力电机结构原理	3
任务 2 动力电机控制技术结构原理	21
项目二 新能源汽车电机控制技术	45
任务 1 基础知识	49
任务 2 电流与电压	51
技能训练一 电压与电流之间关系	52
任务 3 脉冲宽度调制(PWM)	56
技能训练二 认识脉冲宽度调制(PWM)发生器信号形式	57
技能训练三 脉冲宽度调制(PWM)与电压关系	61
技能训练四 脉冲宽度调制(PWM)与电流关系	67
任务 4 正半波	74
技能训练五 脉冲宽度调制(PWM)与正半波	74
任务 5 正半波与负半波的生成	79
技能训练六 交流电压生成	81
技能训练七 正弦波电流	84
任务 6 三相逆变器	88
技能训练八 三相交流电的生成	90
任务 7 总结——PWM 与交流电(AC)	93
项目三 新能源汽车直流-直流转换器	97
任务 1 直流-直流转换器	101
任务 2 直流-直流升压转换器	105
技能训练一 手动调节控制的升压转换	106
技能训练二 脉宽(PWM)调节控制的升压转换	114
技能训练三 频率调节控制的升压转换	119



技能训练四 升压后电压纹波影响因素	124
任务 3 直流-直流降压转换器	129
技能训练五 手动调节控制的降压转换	130
技能训练六 脉宽(PWM)调节控制的降压转换	137
技能训练七 频率调节控制的降压转换	142
技能训练八 降压后电压纹波影响因素	147
项目四 再生制动能量回收系统	153
任务 1 基础知识	155
技能训练一 二极管单向导电特性验证	159
技能训练二 直流电压下二极管单向导电特性验证	160
技能训练三 交流电压下二极管单向导电特性验证	165
任务 2 能量再生过程	169
技能训练四 半波整流	173
技能训练五 桥式整流	176
技能训练六 故障实验	180
技能训练七 电压平滑化	188
技能训练八 能量再生	190
参考文献	200



扫码可见本项目微课

动力电机及控制技术 结构原理

项目 一

新能源汽车是基于电力电子技术的基本工作原理,主要实现电能变换的电力电路基本形式。电力电子技术的主要内容是研究实现这些变换的电路结构及其工作原理。

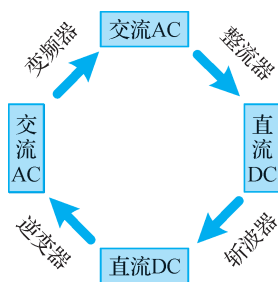


图 1-1 电力电子变换器逻辑图

表 1-1 实现电能变换的电力电路基本形式

形式	简称
交流-直流变换(AC/DC 变换)	整流
直流-交流变换(DC/AC 变换)	逆变
直流-直流变换(DC/DC 变换)	斩波
交流-交流变换(AC/AC 变换)	变频

新能源汽车工作的几个典型工况:

1. 驱动时

驱动时:逆变器将蓄电池提供的直流电逆变为电压、频率可调的三相交流电,供电动机使用,驱动汽车运行。

2. 制动时

制动时:电动机做发电机运行,将动能变为电能产生三相交流电,经逆变器变为直流电反馈回蓄电池,进行再生制动。

3. 运行速度控制

运行速度控制:采用 PWM 控制改变逆变器输出的三相交流电的电压和频率就可以改变电机的转速,从而对汽车调速。

4. 运行方向控制

运行方向控制:通过改变逆变器中 IGBT 的导通顺序就可以改变输出三相交流电的相



序,即改变了三相异步电动机定子三相绕组所接交流电的相序,三相异步电动机反转,从而改变汽车的运行方向。

5. 驱动与制动控制

驱动与制动控制:通过改变逆变器输出三相交流电的频率,改变三相异步电动机的转差频率的正负,控制三相异步电动机是处于电动机状态还是发电机状态,从而控制汽车的驱动和制动。

驱动电动机是新能源汽车行驶中的主要执行结构,驱动电动机及控制系统是新能源汽车的核心部件之一,其驱动特性决定了汽车行驶的主要性能指标,它是电动汽车的重要部件。

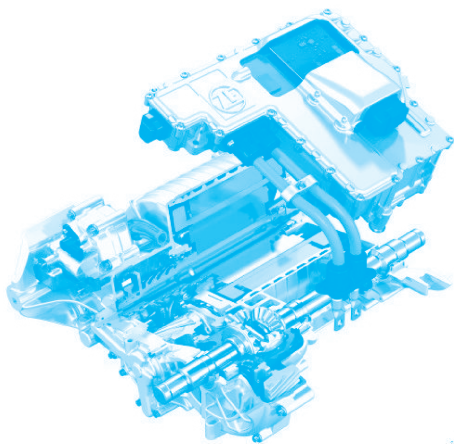


图 1-2 驱动电机结构



项目导读



- (1) 新能源汽车中驱动电机和工业生产用的电机一样吗?
- (2) 如何维护和保养新能源汽车驱动电机及控制系统?



知识目标



- (1) 熟悉不同类型的驱动电机性能与优缺点。
- (2) 掌握驱动电机及控制系统的组成及作用。



技能目标



- (1) 能够识别电机及控制系统的各个组成部分。



- (2) 在制造商手册和诊断设备的帮助下,对电机及控制系统进行性能检测和故障诊断。
- (3) 制定维修方案、安全规范,进行故障诊断操作。



- (1) 与客户沟通交流。
- (2) 具有团队协作能力。
- (3) 养成良好的职业习惯,提高劳动素养。
- (4) 树立安全责任意识。

任务1 动力电机结构原理

电动机是应用电磁感应原理运行的旋转的电磁机械,用于实现电能向机械能的转换。运行时从供电系统吸收电功率,向机械系统输出机械功率,同时驱动电机系统还要有能量回收功能。根据设计原理与分类方式的不同,电动机的具体构造与成本构成也有所差异。

一、新能源汽车对驱动电动机的要求

电动汽车对驱动电动机主要有起动转矩要大、恒功率区宽、调速范围大、效率要高、能量回收率要高、尺寸要小、可靠性高等要求。

二、电动机的类型及特点

1. 直流电动机

直流电动机按有刷直流电机和无刷直流电机区分,有刷直流电机因维护不方便被无刷直流电机取代。无刷直流电机已成为入门级电动车或电动自行车所使用的最为普遍的一种类型,但在常见的新能源汽车中已经不多见。

无刷电机:无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成,是一种典型的机电一体化产品。由于无刷直流电动机是以自控式运行的,所以不会像变频调速下重载启动的同步电机那样在转子上另加启动绕组,也不会因负载突变时产生振荡和失步。中小容量的无刷直流电动机的永磁体,现在多采用高磁能级的稀土钕铁硼(Nd-Fe-B)材料。因此,稀土永磁无刷电动机的体积比同容量三相异步电动机缩小了一个机座号。

有刷电机:有刷电机是内含电刷装置的将电能转换成机械能(电动机)或将机械能转换成电能(发电机)的旋转电机。区别于无刷电机,电刷装置是用来引入或引出电压和电流的。有刷电机是所有电机的基础,它具有启动快、制动及时、可在大范围内平滑地调速、控制电路相对简单等特点。

(1) 有刷电机工作原理

有刷电机是大家最早接触的一类电机,中学时物理课堂上介绍电动机也是以它为模型来展示的。有刷电机的主要结构就是定子+转子+电刷,通过旋转磁场获得转动力矩,从而输出动能。电刷与换向器不断接触摩擦,在转动中起到导电和换相作用。

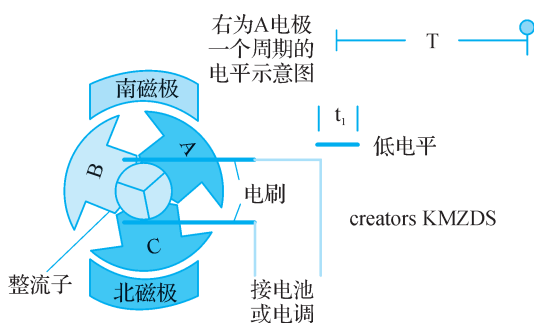


图 1-3 有刷电机工作原理

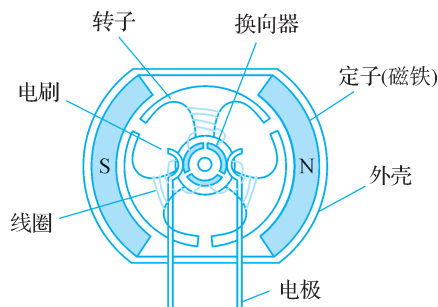


图 1-4 有刷电机结构

有刷电机采用机械换向，磁极不动，线圈旋转。电机工作时，线圈和换向器旋转，磁钢和碳刷不转，线圈电流方向的交替变化是随电机转动的换相器和电刷来完成的。

在有刷电机中，这个过程是将各组线圈的两个电源输入端，依次排成一个环，相互之间用绝缘材料分隔，组成一个像圆柱体的东西，与电机轴连成一体，电源通过两个碳元素做成的小柱子（碳刷），在弹簧压力的作用下，从两个特定的固定位置，压在上面线圈电源输入环状圆柱上的两点，给一组线圈通电。

随着电机转动，不同时刻给不同线圈或同一个线圈的不同的两极通电，使得线圈产生磁场的 N-S 极与最靠近的永磁铁定子的 N-S 极有一个适合的角度差，磁场异性相吸、同性相斥，产生力量，推动电机转动。碳电极在线圈接线头上滑动，像刷子在物体表面刷，因此叫碳“刷”。

相互滑动，会摩擦碳刷，造成损耗，需要定期更换碳刷；碳刷与线圈接线头之间通断交替，会产生电火花，产生电磁波，干扰电子设备。

(2) 无刷电机工作原理

无刷电机中，换相的工作交由控制器中的控制电路（一般为霍尔传感器+控制器，更先进的技术是磁编码器）来完成。

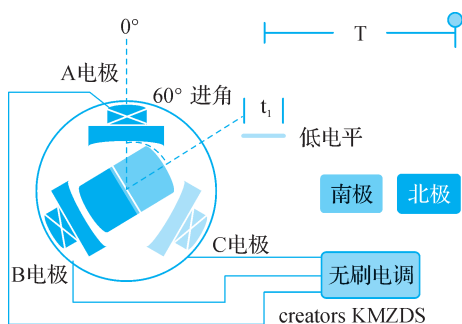


图 1-5 无刷电机工作原理

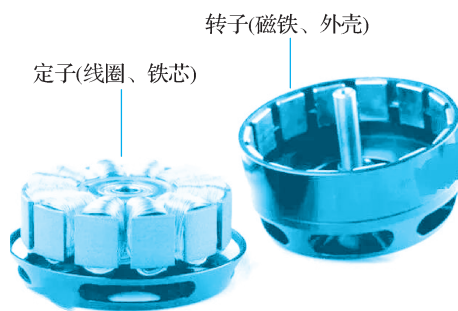


图 1-6 无刷电机结构

无刷电机采取电子换向，线圈不动，磁极旋转。无刷电机，是使用一套电子设备，通过霍尔元件，感知永磁体磁极的位置，根据这种感知，使用电子线路，适时切换线圈中电流的方向，保证产生正确方向的磁力来驱动电机，消除了有刷电机的缺点。

这些电路，就是电机控制器。无刷电机的控制器，还可以实现一些有刷电机不能实现的



功能,比如调整电源切换角,制动电机,使电机反转,锁住电机,利用刹车信号,停止给电机供电。现在电瓶车的电子报警锁,就充分利用了这些功能。

无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成,是一种典型的机电一体化产品。由于无刷直流电动机是以自控式运行的,所以不会像变频调速下重载启动的同步电机那样在转子上另加启动绕组,也不会在负载突变时产生振荡和失步。

2. 异步电动机

异步电动机可归纳到交流电动机范畴。异步电动机具备变频调速的能力,其效果相当于装有无级变速器的车辆在加速时发动机转速与车速较为线性的对应关系。车辆的倒挡,异步电动机也可轻易通过自身正反转的切换来实现,功能上能够满足电动车的技术需求。特斯拉就使用异步电动机作为后驱动桥。

异步电动机实现动能回收也更为容易。当车辆滑行或制动时,车轮反拖电动机转动,在这个工况下,电动机可进行发电并将电能回收到电池中,以此延长车辆的续航里程。

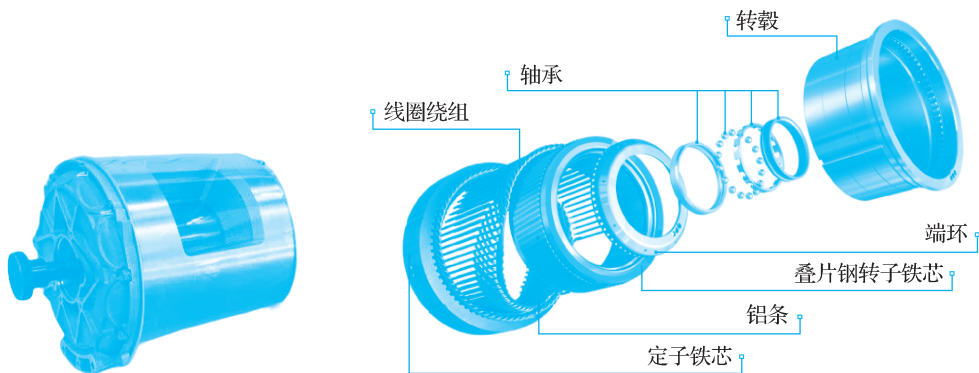


图 1-7 异步电动机结构

异步电动机按照转子结构分为两种形式,分别为鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机。这里就以最常用的鼠笼式异步电动机为例。

鼠笼式异步电动机的转子一般采用铸铝式转子,它的绕组是铜条或者铝条,绕组两端都焊接在一起,像一个老鼠笼子一样。

定子绕组通入三相交流电以后,定子旋转磁场会切割转子绕组,从而在绕组(铝条)上感应出电流。绕组(铝条)上有电流通过以后,在磁场中会受到电磁力的作用而加速旋转。

随着电动机(转子)旋转速度越来越快,当转子速度=定子磁场速度时,两者保持相对静止。此时,旋转磁场和转子绕组没有相对运动(即没有切割转子绕组),转子就会失去电磁力而减速。当电动机减速以后,旋转磁场和转子绕组又出现了相对运动,转子又会受到电磁力而加速旋转。

简单地讲,交流异步电动机是依靠旋转磁场和转子之间相对运动来获取旋转力的。当电动机转速一旦达到磁场速度,就会失去旋转力而减速;减速以后又有相对运动,又会加速,所以电动机一直处于加速、减速状态。因为电机转速和磁场转速不一致,所以叫异步电动机。

3. 永磁同步电动机

永磁同步电动机的结构与上面提到的直流电动机相似,因此,它具备无刷直流电动机结



构简单、运行可靠、功率密度大、调速性能好等特点,同时由于永磁同步电动机采用的驱动方式不同于直流电动机,所以在噪声以及控制精度环节,永磁同步电动机更胜一筹。永磁同步电动机的体积也更小,布置更为灵活,更轻的自重对整车重量也有贡献。

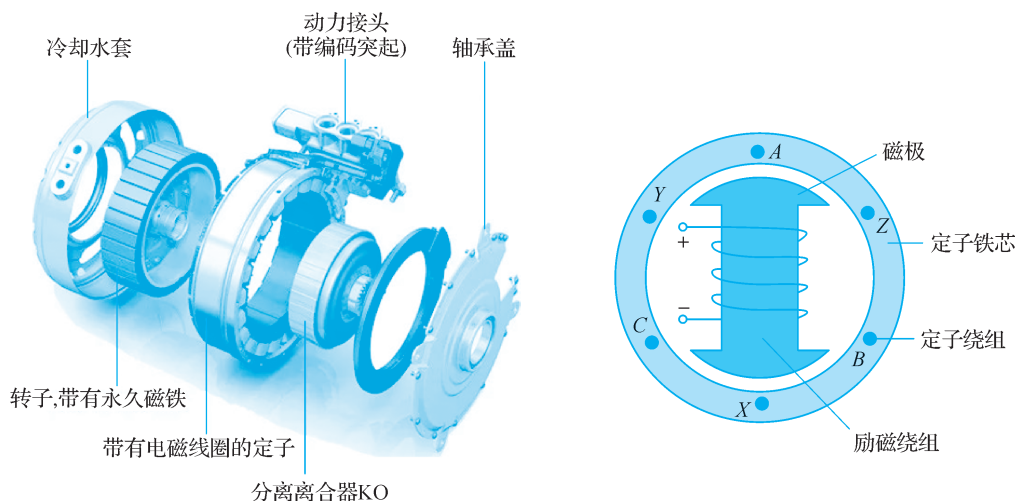


图 1-8 永磁同步电动机结构

假设把永磁铁做成电动机转子,由于转子永磁铁和定子磁场互相吸引,所以转子永磁铁会跟着定子绕组的磁场一起旋转。如果定子铁芯磁场旋转越快,转子(电动机)的速度也就越快。因为电动机转速和磁场的转速一致,所以叫同步电动机。

由于永磁铁的磁场强度比较弱,所带的负荷比较轻,所以很多同步电动机转子都采用电磁铁来替代用永磁铁,也就是把转子做成一个电磁铁。电磁铁的线圈称之为励磁绕组。

4. 开关磁阻电机

电动汽车开关磁阻电机的基本组成部件有转子、定子和电子开关。

电动汽车开关磁阻电机的转子由导磁性能良好的硅钢片叠压而成,转子的凸极上无绕组。开关磁阻电机转子的作用是构成定子磁场磁通路,并在磁场力的作用下转动,产生电磁转矩。转子的凸极个数为偶数。实际应用的开关磁阻电机的转子凸极最少有 4 个(2 对),最多有 16 个(8 对),如图 1-9 所示。

电动汽车开关磁阻电机的定子铁心也是由硅钢片叠压而成的,成对的凸极上绕有两个互相串联的绕组。定子的作用是定子绕组按顺序通电,产生的电磁力牵引转子转动。定子凸极的个数也是偶数,最少的有 6 个,最多的有 18 个。

与其他类型的电机相比,开关磁阻电机的结构和工作原理都有很大的不同。电动汽车开关磁阻电机的定子和转子均为双凸极结构,依据磁路磁阻最小原理产生电磁转矩,使转子转动。

开关磁阻电机的定子双凸极上绕有集中绕组,转子凸极上没有绕组。其电磁转矩产生如图 1-10 所示。

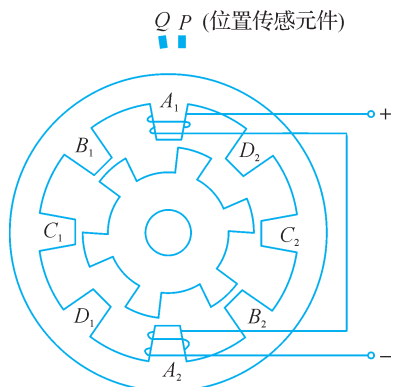


图 1-9 开关磁阻电动机的基本结构

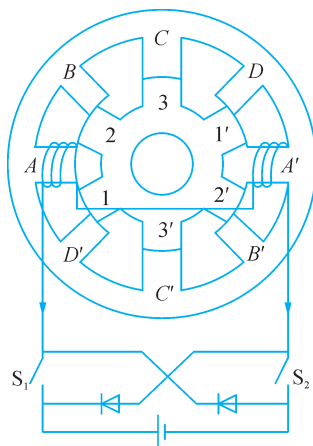


图 1-10 四相 8/6 极开关磁阻电机原理图

图中仅画出其中一相绕组(A相)的连接情况。当定子、转子凸极正对时,磁阻最小;当定子、转子凸极完全错开时,磁阻最大。当B相绕组施加电流时,由于磁通总是选择磁阻最小的路径闭合,为减少磁路的磁阻,转子将顺时针旋转,直到转子凸极2与定子凸极B的轴线重合。

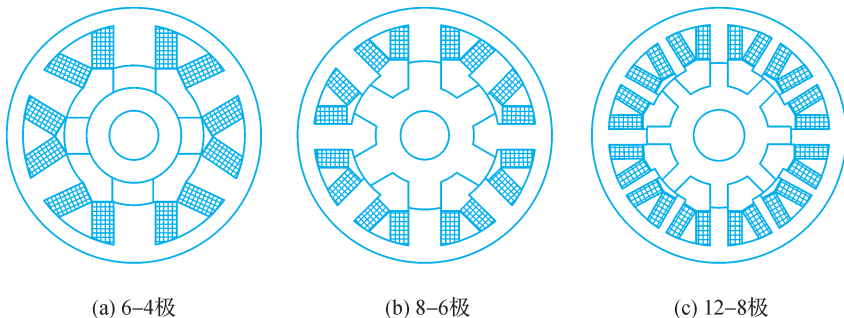


图 1-11 开关磁阻电机的不同凸极配比

当各电子开关依次控制A、B、C、D四个定子绕组通电时,转子就会不断受电磁力的作用而持续转动。如果定子绕组按D—A—B—C的顺序通电,则转子就会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转。反之,若按B—A—D—C的顺序通电,则电动汽车电机转子就会沿顺时针方向转动。

根据定子、转子凸极对数的配比,开关磁阻电机可以设计成不同的结构,如图1-11所示。

5. 轮毂电动机

轮毂电动机诞生于100年前,现在仍旧停留在概念阶段。目前,很多配套厂商都能够拿出轮毂电动机以及驱动车桥的设计方案,但少有厂商能够予以采纳,轮毂电动机给簧下质量带来过重的负担,进而影响车辆的操控性能。



图 1-12 轮毂电动机



三、常见新能源车型驱动电动机

比亚迪 E5 纯电动汽车使用的是三相交流永磁同步电机,如图 1-13 所示,向外输出转矩,驱动汽车前进或后退;同时,在滑行、制动过程时又可以通过电机将其动能转化为电能,即可以作为发电机发电,具有密度高、效率高、可靠性高、耐久性高且体积小等优点。其最大功率 160 kW,最高转速 12 000 r/min,最大的转矩是 310 N·m,工作电压 650 V,重量是 65 kg。

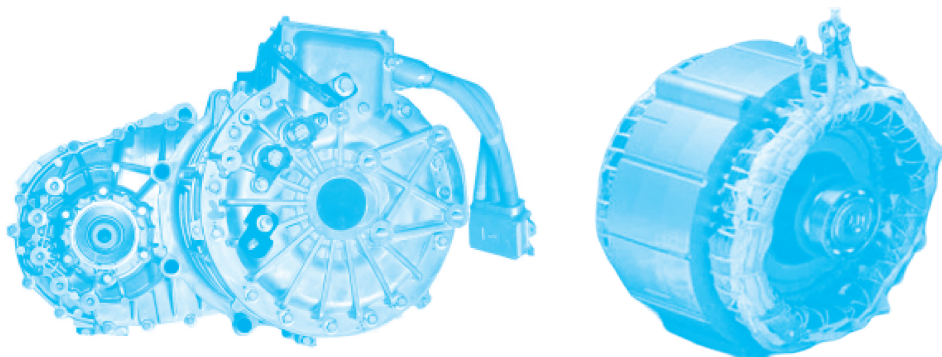


图 1-13 比亚迪 E5 交流无刷永磁同步电动机

北汽 EV200 电动汽车采用永磁同步电动机作为驱动电动机,如图 1-14 所示,具有效率高、体积小、重量轻及可靠性高等优点。它是动力系统的重要执行机构,是电能与机械能转化的部件,且自身的运行状态等信息可以被采集到驱动电机控制器。

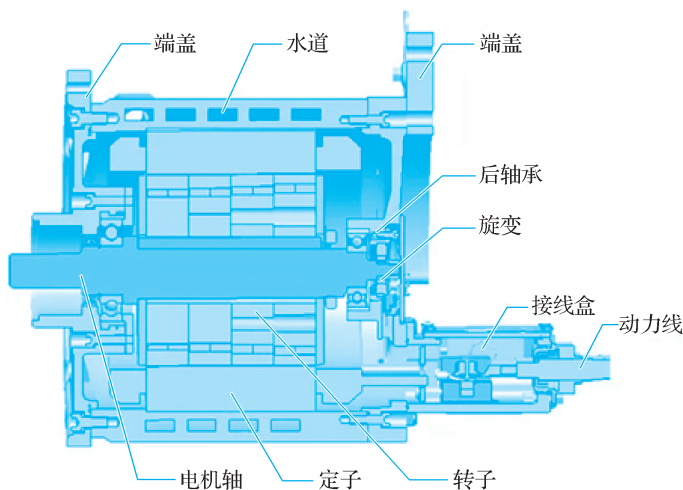


图 1-14 北汽 EV200 电动汽车永磁同步电动机

吉利帝豪 EV450 驱动电机也是三相交流永磁同步电机,如图 1-15 所示,当三相交流电被接入到定子线圈中,即产生了旋转的磁场,这个旋转的磁场牵引转子内部的永磁体,产生和旋转磁场同步的转矩。使用旋转变压器检测转子的位置和电流传感器检测线圈的电流,从而控制驱动电机的转矩输出。其最大功率达到了 120 kW,最大扭矩提升至 250 N·m,可以在 9.3 秒内完成 0~100 km/h 的加速,0~50 km/h 只需 4.1 秒。

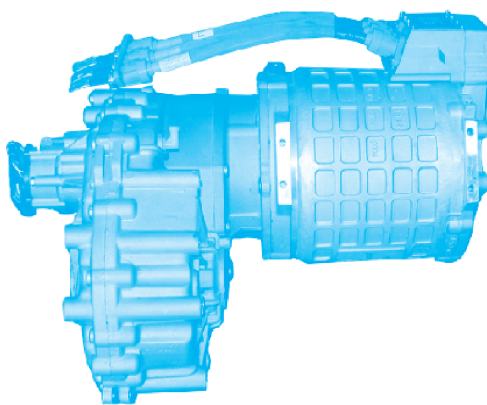


图 1-15 吉利帝豪 EV450 驱动电机

丰田 THS-II 系统有 MG1 和 MG2 两个电动/发电机,均为紧凑、轻型和高效的交流永磁电动机,用来驱动车辆和提供再生制动。

两个电动/发电机和复合齿轮式驱动机构封装在一起,构成动力驱动桥。

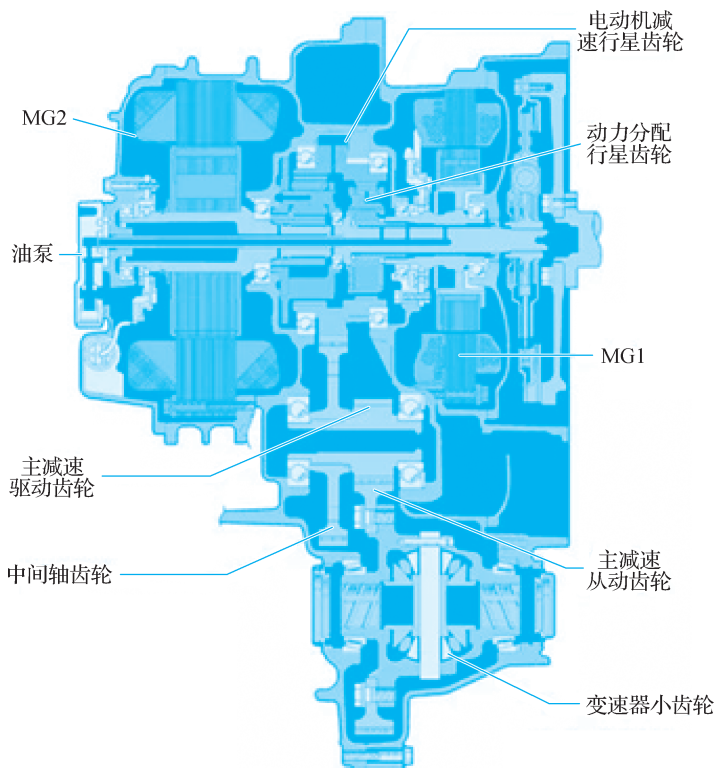


图 1-16 丰田 THS-II 驱动电机

MG1 对动力电池再充电并供电以驱动 MG2。此外,通过调节发电量(从而改变发电机转速),MG1 有效地控制传动桥的无级变速功能。同时, MG1 还可作为起动机来起动发动机。



再生制动过程中, MG2 将车辆的动能转换为电能, 并存储到动力电池内。MG1 和 MG2 采用带水泵的水冷式冷却系统, 降低工作时的热量。

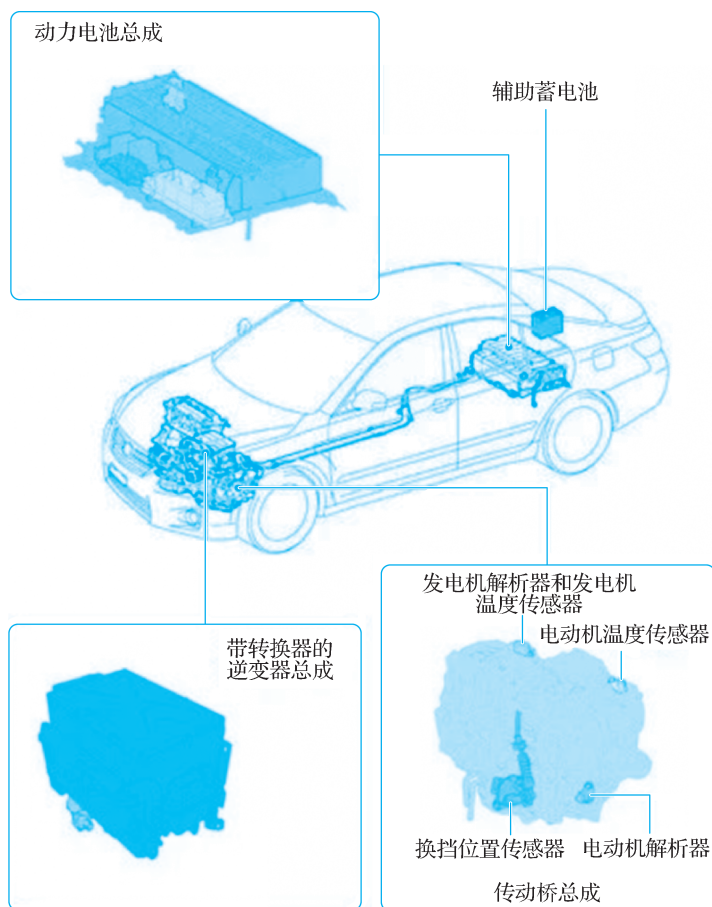


图 1-17 丰田混合动力结构

四、纯电车型减速器

1. 减速器结构与原理

宝马 i3 的变速器由宝马集团自行研发, 变速器的生产也由宝马 Dingolfing 工厂相关部门负责。

变速器总传动比为 $9.7:1$, 因此, 变速器输入端的转速是变速器输出端的 9.7 倍。该传动比通过两个圆柱齿轮对来实现, 因此, 在变速器内输入轴旁还有一个中间轴。变速器输出端处的圆柱齿轮与差速器壳体固定连接在一起并驱动差速器。变速器内部齿轮结构如图 1-18 所示。差速器将转矩分配给两个输出端并在两个输出端之间进行转速补偿。

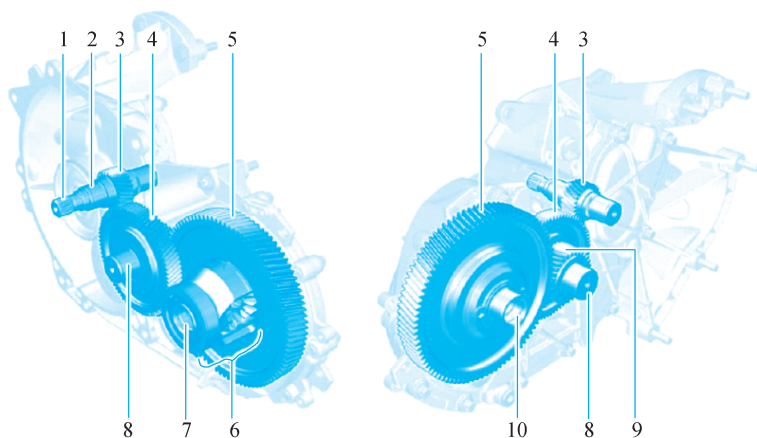


图 1-18 变速器内部齿轮结构(宝马 i3)

1-啮合轴(用于连接电机驱动轴);2-变速器输入轴;3-输入轴上的圆柱齿轮;4-中间轴上的圆柱齿轮;5-变速器输出端处的圆柱齿轮;6-变速器;7-左侧半轴接口;8-中间轴;9-中间轴上的圆柱齿轮 3;10-右侧半轴接口。

图 1-19 所示的结构示意图以简化形式展示了变速器内的转矩传输情况。

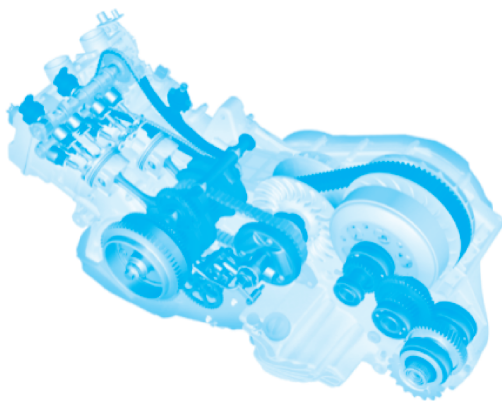


图 1-19 变速器内部转矩传输

电动汽车变速器结构通常由铸铝外壳、变速器、驱动轴、减速齿轮、副轴组成。挡位选择器和变速器之间没有机械连接。变速器齿轮组是常啮合的。变速器没有机械空挡或倒挡,没有停车棘爪。反向驱动由反转电机转矩的极性来实现,空挡则通过电机断电来实现。

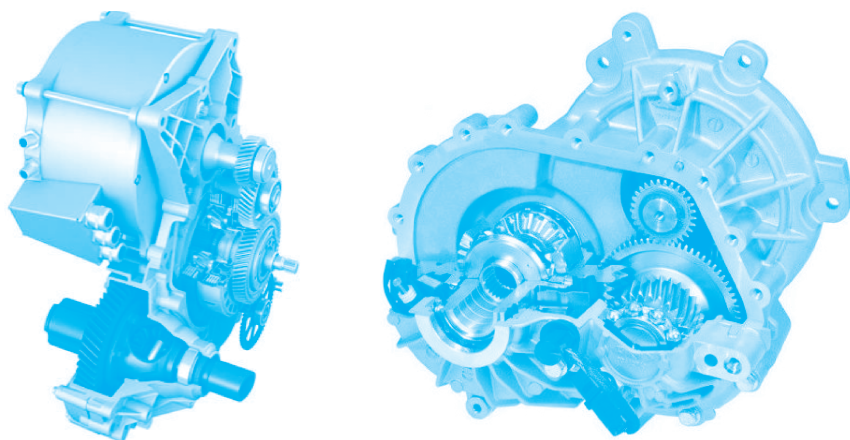


图 1-20 变速器结构

2. 减速器拆装与检测

以北汽新能源 EU5 车型为例,该车减速器总成拆装步骤如下。

- (1) 拆卸前熟知新能源汽车高压安全操作规范。
- (2) 拆卸蓄电池托盘。
- (3) 拆卸电动真空泵总成。
- (4) 拆卸两侧半轴总成。
- (5) 拆卸电机前部挡板。
- (6) 将动力总成举升装置置于动力总成下部,如图 1-21 所示。
- (7) 拆卸后悬置与减速器固定螺栓 A 与螺栓 B,如图 1-22 所示。

螺栓 A 规格:M14×1.5×80;紧固力矩:150~170 N·m;使用工具:21 mm 六角套筒。

螺栓 B 规格:M12×1.25×80;紧固力矩:85~95 N·m;使用工具:15 mm 六角套筒。

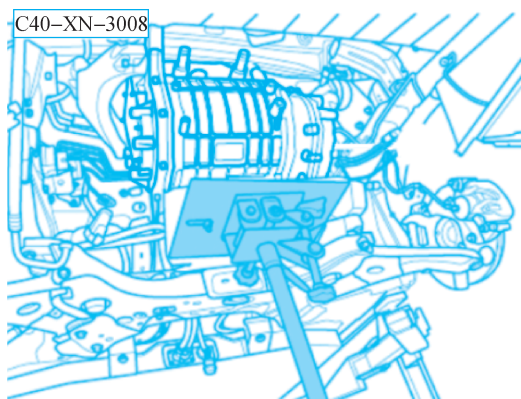


图 1-21 动力总成举升装置布置

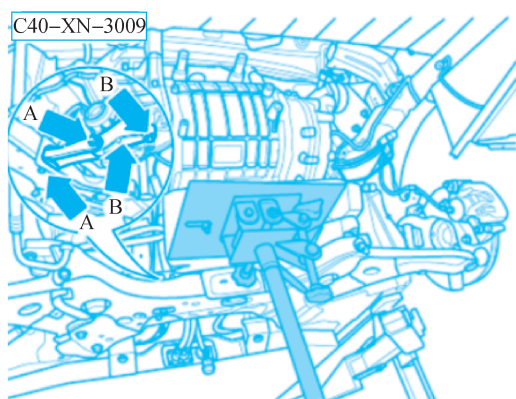


图 1-22 拆卸后悬置与减速器的紧固螺栓

- (8) 旋出左悬置支架与减速器固定螺栓,取下左悬置支架,如图 1-23 所示。
螺栓规格:M10×1.25×50;紧固力矩:60~70 N·m;使用工具:13 mm 六角套筒。
- (9) 旋出固定螺栓 A 与螺栓 B,拆下 P 位电机总成,如图 1-24 所示。



螺栓 A 规格:M6×1.0×40;紧固力矩:8~10 N·m;使用工具:10 mm 六角套筒。
螺栓 B 规格:M6×1.0×15;紧固力矩:8~10 N·m;使用工具:10 mm 六角套筒。

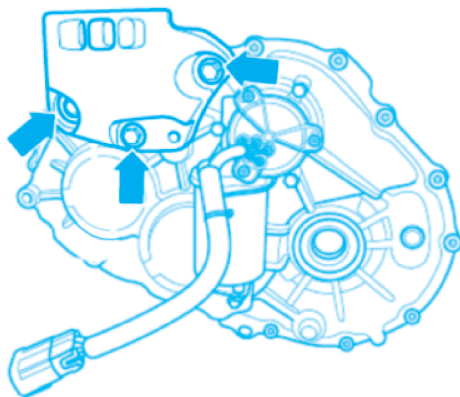


图 1-23 取下左悬支架与减速器固定螺栓

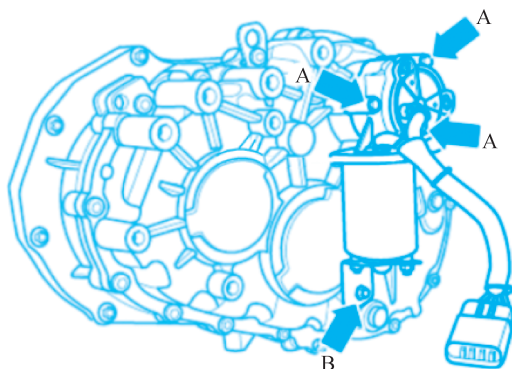


图 1-24 旋出减速器固定螺栓

(10) 安装以倒序进行,同时注意以下事项:驱动电机花键 A 区域与减速器连接花键 B 区域需要均匀涂抹润滑脂,如图 1-25 所示。润滑脂规格:德国力魔 LM48 润滑脂,用量 20 g。

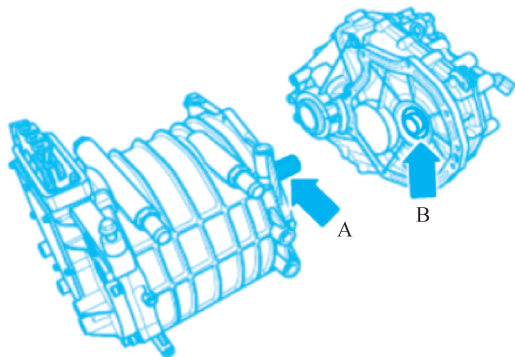


图 1-25 润滑脂涂抹位置

3. 减速器故障排除

以比亚迪秦 EV 电动汽车为例,减速器一般故障的排除方法见表 1-2。

表 1-2 减速器故障排除方法

常见故障	故障确认	排除方法
差速器油封漏油	目视 2 个差速器油封位置(如图 1-26)或触摸检测,如果漏油,会有明显的油漏痕迹	更换新的差速器油封(1. 先拆掉漏油油封,找一尖头螺栓,拧入油封内,然后用钳子拔出油封即可;2. 装新油封,把油封套入油封工装上,然后把工装对准油封孔,放到合适位置,再用锤子轻轻敲到合适位置即可,确保油封与油封口处平滑,无凹凸)



(续表)

常见故障	故障确认	排除方法
放油螺栓处漏油	目视放油螺栓(如图 1-27)处或触摸检测,如果漏油,会有明显的油漏痕迹	更换磁性内六角螺栓(放油螺栓)垫片或内六角螺栓(用 H10 扭矩扳手松开放油螺栓,检查是垫片还是螺栓的问题,再进行更换)
行驶异响	整车行驶时,有明显异响或者关窗后行驶有异响	先初步确定是哪里出现的异响,进行录音,将录音数据提供给技术部门进行同步确认,再根据实际情况进行维修。如果确定是前驱电动总成出现的异响,更换新件处理
其他问题	确认问题故障	提供故障数据发给技术部门同步排查,然后根据结果安排维修

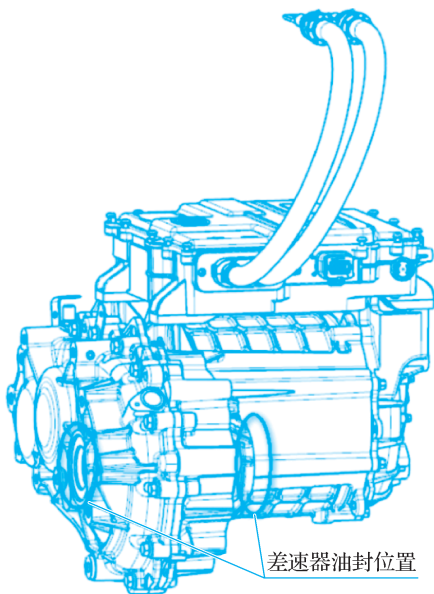


图 1-26 前变速器总成油封位置

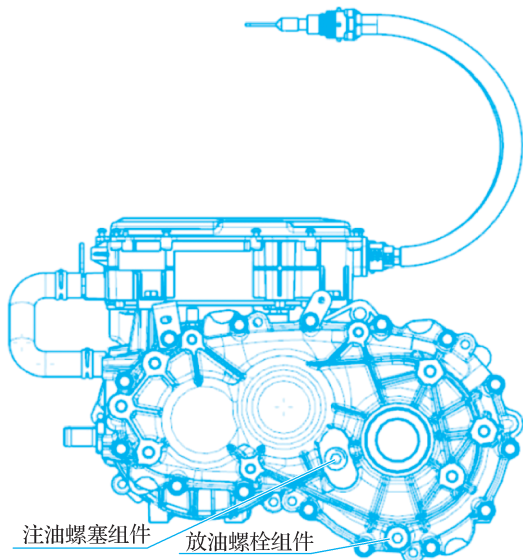


图 1-27 前变速器总成放油螺栓位置

五、混合动力车型变速器

1. 混合动力变速器结构与原理

丰田 P410 混合动力汽车传动桥总成包括 2 号电动机发电机(MG2)(用于驱动车辆)和 1 号电动机发电机(MG1)(用于发电),采用带复合齿轮装置的无级变速器装置。该传动桥应用于丰田雷凌-卡罗拉双擎、第 7 代凯美瑞混动、第 3 代普锐斯、雷克萨斯 CT200H 与 ES300H 等车型上。

此混合动力传动桥系统使用电子变速杆系统进行换挡控制。

传动桥主要包括 MG1、MG2、复合齿轮装置、变速器输入减振器总成、中间轴齿轮、减速齿轮、差速器齿轮机构和油泵,组成部件如图 1-28 所示。

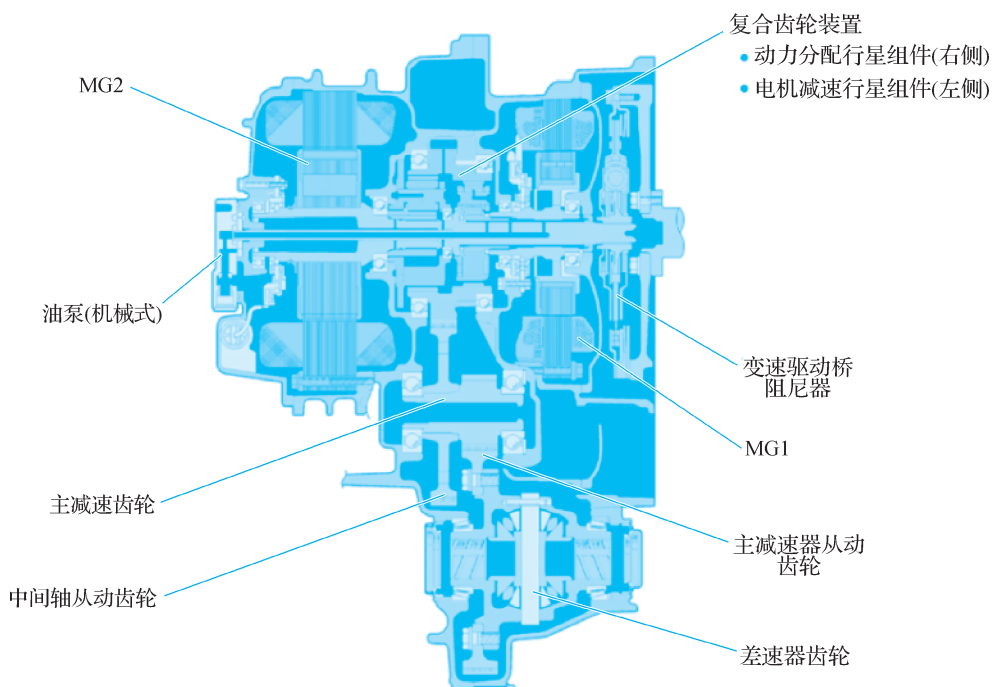


图 1-28 丰田 P410 传动桥内部结构

传动桥为三轴结构:复合齿轮装置、变速器输入减振器总成、油泵、MG1 和 MG2 安装在输入轴上;中间轴从动齿轮和减速主动齿轮安装在第二轴上;减速从动齿轮和差速器齿轮机构安装在第三轴上;齿轮组组成如图 1-29 所示。

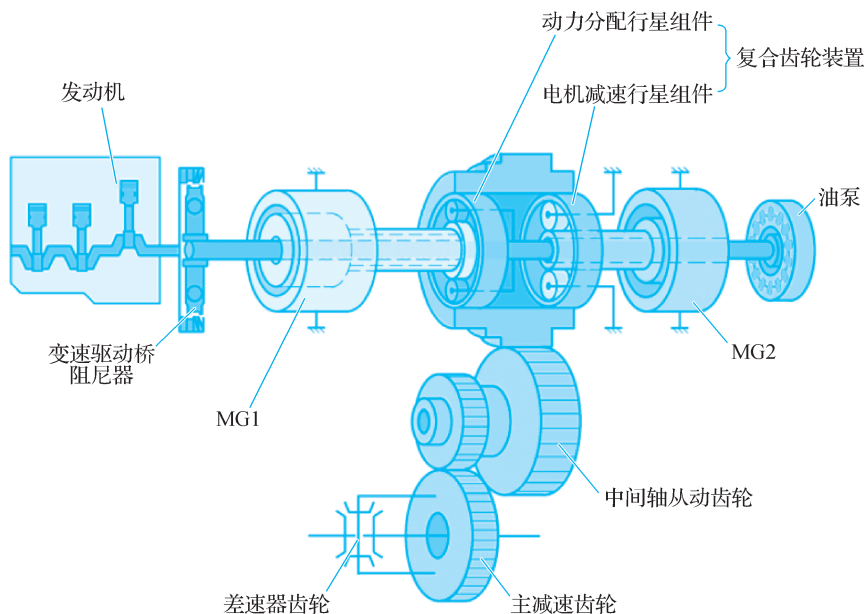


图 1-29 驱动桥齿轮组组成



发动机、MG1 和 MG2 通过复合齿轮装置机械连接。每一个行星齿圈与复合齿轮机构结合,如图 1-30 所示。复合齿轮装置包括动力分配行星齿轮机构和电动机减速行星齿轮机构,各行星齿圈与复合齿轮集成于一体。另外,此复合齿轮还集成了中间轴主动齿轮和驻车挡齿轮。

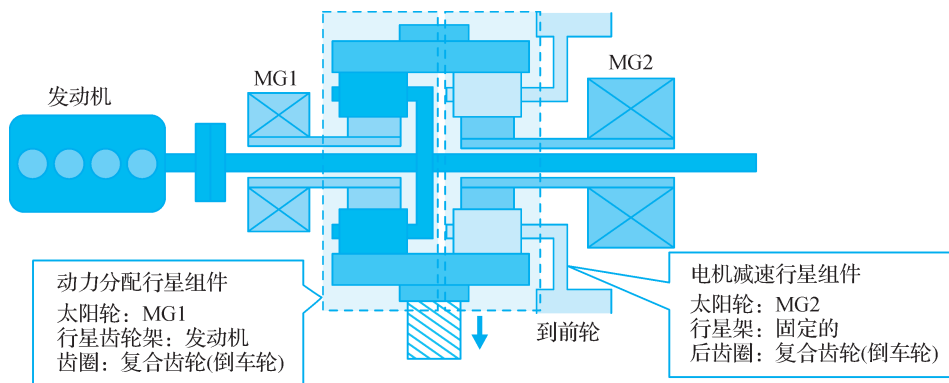


图 1-30 齿轮组连接与动力分配

动力分配行星齿轮机构将发动机的原动力分成两路:一路用来驱动车轮,另一路用来驱动 MG1。因此, MG1 可作为发电机使用。为了降低 MG2 的转速,采用电机减速行星齿轮机构,使高转速、大功率的 MG2 最佳适应复合齿轮。该齿轮装置结构如图 1-31 所示。

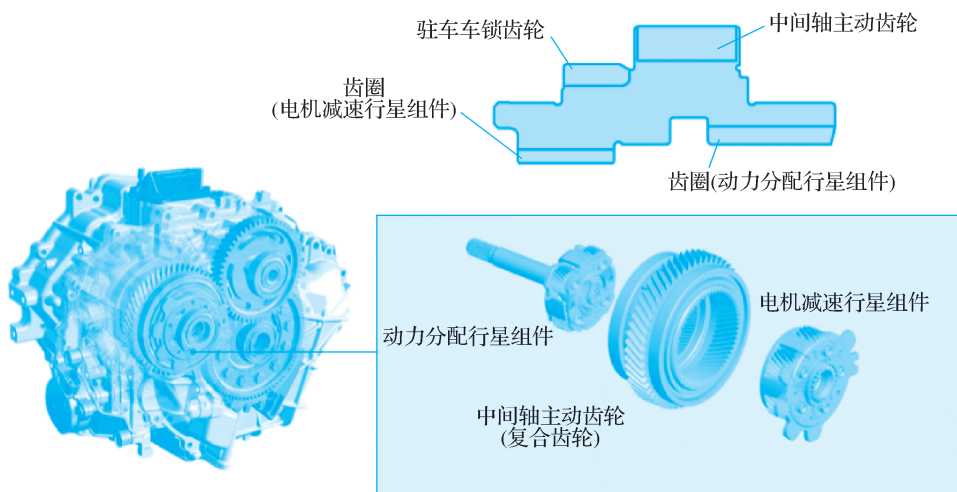


图 1-31 复合齿轮机构

4EL70 是一个全自动后轮驱动变速器,包含一个电子控制型连续可变电动变速器。它包括 1 个输入轴、3 个静止式和 2 个旋转式摩擦离合器总成、1 个液压增压和控制系统、1 个电动油液泵、3 个行星齿轮组和 2 个电动驱动电机。其内部结构如图 1-32 所示,机械部件如图 1-33 所示。

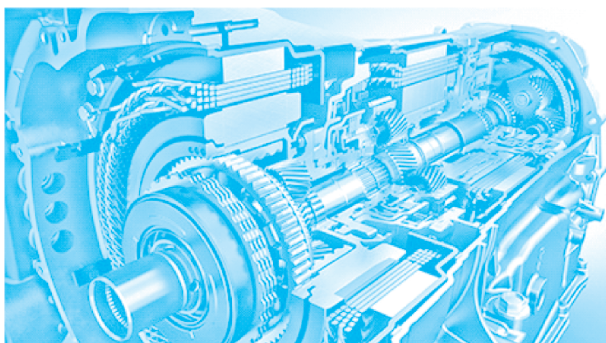


图 1-32 4EL70 变速器内部结构

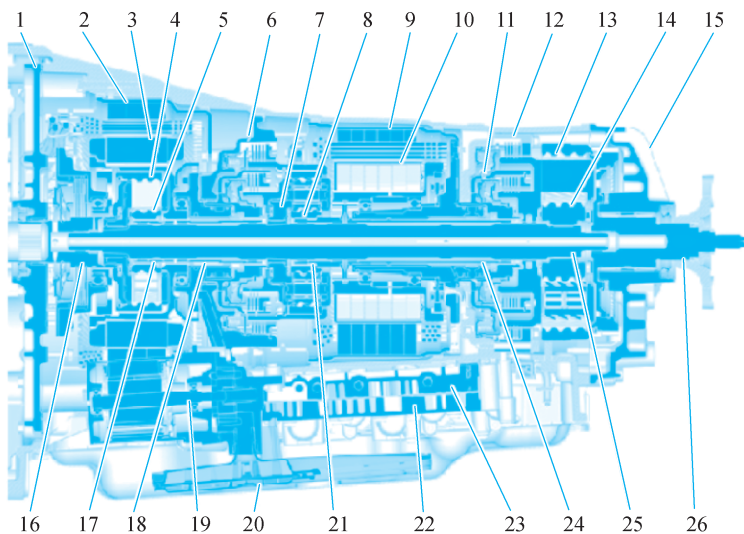


图 1-33 4EL70 变速器机械部件

1-自动变速器扭转减速度壳体;2-驱动电机定子(位置1);3-驱动电机转子(位置1);4-太阳齿轮支架(位置1);5-太阳齿轮(位置1);6-可变1-2-3-4挡和1-2-3挡离合器;7-太阳轮支架(位置2);8-太阳齿轮(位置2);9-驱动电机定子(位置2);10-驱动电机转子(位置2);11-可变3-4挡和2-3挡离合器壳体;12-可变1-2挡和1-2挡离合器壳体;13-太阳齿轮支架(位置3);14-太阳齿轮(位置3);15-自动变速器壳体加长件;16-输入轴;17-太阳齿轮轴(位置1);18-2-3挡和1-2-3挡离合器轴;19-自动变速器油泵;20-自动变速器机油滤清器;21-太阳齿轮轴(位置2);22-控制阀电磁阀阀体;23-上控制阀体;24-可变3-4挡和2-3挡离合器轴;25-主轴;26-输出轴。

2. 混动变速器数据流分析

以比亚迪 6HDT45 变速器为例,对其数据流进行分析。

变速器的故障诊断经常需要从数据入手,常用的数据主要包括:发动机转速、输入轴转速、离合器实际压力、促动器位置等。下面介绍各主要数据的正常范围及故障的诊断。



(1) 离合器实际压力

离合器实际压力一般在 300~2 800 kPa 之间。当离合器处于分离状态时,离合器实际压力一般在 300~500 kPa 之间;当离合器处于结合状态时,离合器实际压力一般在 800 kPa 以上。离合器压力数据如图 1-34 所示。

如果出现离合器压力在 2 800 kPa 以上,踩下加速踏板,发动机转速飙升,车速提升缓慢,则说明离合器打滑,一般是由离合器片烧损导致,需更换离合器。

如果出现离合器压力低于 300 kPa,一般会出现行驶中突然熄火和无动力输出故障,可先检查变速器油量是否不足,油量不足需补加变速器油,若油量充足则更换电液模块,若故障还没消除的话则拆箱检查。

数据流 模块信息 模块更新 主动控制				
◀ 3 ▶ 请输入页码				
数据项	数据值		最小值	最大值
离合器阀1实际电流	304.5	mA	0	1500
离合器1实际压力	810	kPa	0	3500
离合器1滑磨点	808		0	2500
EPB状态	释放			
安全阀2设置电流	375.0	mA	0	1599
安全阀2实际电流	377.3	mA	0	1599
离合器阀2设置电流	0.0	mA	0	1500
离合器阀2实际电流	0.0	mA	0	1500
离合器2实际压力	463	kPa	0	3500
离合器2滑磨点	864		0	2500
遥控驾驶状态	无效数据			
促动器1位置传感器	10.22	mm	-15	15
促动阀3位置传感器	0.00	mm	-15	15
促动器阀1开关状态	关闭			
促动器阀2开关状态	关闭			

图 1-34 离合器压力数据

(2) 离合器滑磨点

离合器滑磨点一般在 600~1 000 之间,会随着车辆的使用情况发生变化,如图 1-35 所示。离合器滑磨点过小会造成的故障现象一般有起步发冲和升挡顿挫。离合器滑磨点过大会造成起步迟钝故障,也会出现升挡顿挫。发生离合器滑磨点过大或者过小时,可热车之后再操作离合器自适应,若仍无法排除故障需更换离合器。



数据流 模块信息 模块更新 主动控制					
◀ 3 ▶ 请输入ID					
数据项	下一页	数据值		最小值	最大值
离合器阀1实际电流		304.5	mA	0	1500
离合器1实际压力		810	kPa	0	3500
离合器1滑磨点		808		0	2500
EPB状态		释放			
安全阀2设置电流		375.0	mA	0	1599
安全阀2实际电流		377.3	mA	0	1599
离合器阀2设置电流		0.0	mA	0	1500
离合器阀2实际电流		0.0	mA	0	1500
离合器2实际压力		463	kPa	0	3500
离合器2滑磨点		864		0	2500
遥控驾驶状态		无效数据			
促动器1位置传感器		10.22	mm	-15	15
促动阀3位置传感器		0.00	mm	-15	15
促动器阀1开关状态		关闭			
促动器阀2开关状态		关闭			

图 1-35 离合器滑磨点数据

(3) 促动器中位

促动器中位即拨叉中位,促动器 1 为 1/3 挡拨叉,促动器 2 为 2/4 挡拨叉,促动器 3 为 5 挡拨叉,促动器 4 为 6/R 挡拨叉,促动器 5 为 EV 挡与充电挡拨叉。因为促动器 1、2、4、5 均控制两个挡位,故有一个中间位置为 N 位状态。促动器中位值范围(如图 1-36):促动器 1 一般在 1 170~1 330 之间;促动器 2 一般在 1 160~1 320 之间;促动器 3 一般在 1 130~1 290 之间;促动器 4 一般在 1 120~1 280 之间;促动器 5 一般在 1 100 左右(后期可能改变)。

若中位值不在对应范围会出现挂挡打齿、异响或某挡挂不到位等故障,出现这些故障时可以先检查电液模块和自动变速器控制单元(Transmission Control Unit,TCU)插接件是否连接好,针脚有没有歪斜,若无异常则更换电液模块,若故障仍未排除的话需更换变速器处理。



数据流	模块信息	模块更新	自动控制
数据项	数据值	最小值	最大值
离合器1位置	12.43	0	2500
离合器2位置	12.09	0	2500
离合器3位置	关闭		
离合器4位置传感器	9.47	mm	-15 15
离合器5位置传感器	0.00	mm	-15 15
离合器6位置传感器	关闭		
离合器7位置传感器	关闭		
离合器8位置传感器	12.00	0	2500
离合器9位置传感器	12.09	0	2500
离合器10位置传感器	0.0	mA	0 1599
离合器11位置传感器	0.8	mA	0 1599
离合器12位置传感器	34	℃	-60 194
离合器13位置传感器	41	℃	-60 194
离合器14位置传感器	41	℃	-60 194
离合器15位置传感器	4.956	V	0 10

图 1-36 制动器中位数据

(4) 制动器位置

每个制动器有一个位置传感器,用于感应制动器位置,正常情况下制动器位置传感器数值在-11~11 mm 之间,超过 11 mm 的话就会报错,出现故障。制动器位置传感器数据如图 1-37 所示。制动器位置在 1/4/5/6/充电挡时,制动器位置传感器数值为正值;在 2/3/R/EV 挡时,制动器位置传感器数值为负值;空挡位置为 0。图 1-37 中制动器 1 为 10.22,制动器 3 为 0.01,1/3 挡拨叉和 5 挡拨叉在充电挡位置,制动器 2 数值为-9.47,2/4 挡拨叉在 2 挡位置,制动器 5 数值为-8.09,5/R 挡拨叉在 R 位。

数据流	模块信息	模块更新	自动控制
数据项	数据值	最小值	最大值
离合器1位置	12.43	0	2500
离合器2位置	12.09	0	2500
离合器3位置	关闭		
离合器4位置传感器	9.47	mm	-15 15
离合器5位置传感器	0.00	mm	-15 15
离合器6位置传感器	关闭		
离合器7位置传感器	关闭		
离合器8位置传感器	12.00	0	2500
离合器9位置传感器	12.09	0	2500
离合器10位置传感器	0.0	mA	0 1599
离合器11位置传感器	0.8	mA	0 1599
离合器12位置传感器	34	℃	-60 194
离合器13位置传感器	41	℃	-60 194
离合器14位置传感器	41	℃	-60 194
离合器15位置传感器	4.956	V	0 10

图 1-37 制动器位置传感器数据

(5) 油泵信息

HEV 模式下 P 位、D 位数据流信息如图 1-38 和图 1-39 所示:油泵压力在-1.38~21.8 bar 之间(1 bar=105 Pa);电机运行占空比在 0%~100%之间;电机使能信息为使能-禁止;电机转速在 0~10 000 r/min 之间。

数据流	模块信息	模块更新	自动控制
数据项	数据值	最小值	最大值
离合器1位置	12.43	0	2500
离合器2位置	12.09	0	2500
离合器3位置	关闭		
离合器4位置传感器	9.47	mm	-15 15
离合器5位置传感器	0.00	mm	-15 15
离合器6位置传感器	关闭		
离合器7位置传感器	关闭		
离合器8位置传感器	12.00	0	2500
离合器9位置传感器	12.09	0	2500
离合器10位置传感器	0.0	mA	0 1599
离合器11位置传感器	0.8	mA	0 1599
离合器12位置传感器	34	℃	-60 194
离合器13位置传感器	41	℃	-60 194
离合器14位置传感器	41	℃	-60 194
离合器15位置传感器	4.956	V	0 10

图 1-38 HEV 模式下 P 位数据流



图 1-39 HEV 模式下 D 位数据流

任务 2 动力电机控制技术结构原理

电机控制器是连接电机与电池的神经中枢,用来调校整车各项性能。

一、电机控制器基本组成

电机控制器是驱动电机系统的控制中心,又称智能功率模块(IPM),以 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)模块为核心,辅以驱动集成电路和主控集成电路。通过把微电子器件和功率器件集成到同一芯片上,形成了智能功率模块。对所有的输入信号进行处理,并将驱动电机控制系统运行状态的信息通过 CAN2.0 网络发送给整车控制器。驱动电机控制器内含故障诊断电路,当诊断出异常时,它将激活一个错误代码,发送给整车控制器,同时也会存储该故障码和数据。

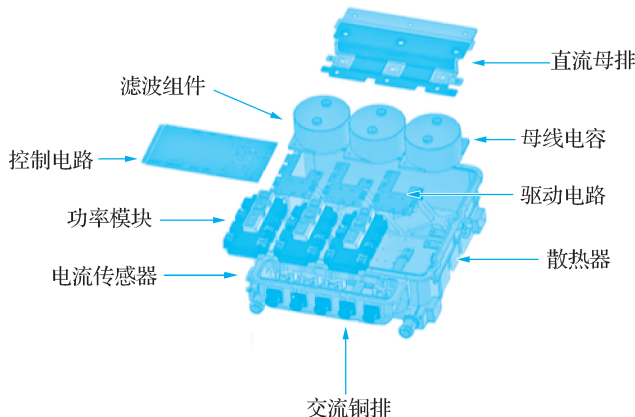


图 1-40 电机控制器内部结构



(1) 电机控制器主要由如下几部分组成:

① 电子控制模块(electronic controller)。电子控制模块包括硬件电路和相应的控制软件。硬件电路主要包括微处理器及其最小系统,对电机电流、电压、转速、温度等状态的监测电路,各种硬件保护电路以及与整车控制器、电池管理系统等外部控制单元数据交互的通信电路。控制软件根据不同类型电机的特点实现相应的控制算法。

② 驱动器(driver)。驱动器将微控制器对电机的控制信号转换为驱动功率变换器的驱动信号,并实现功率信号和控制信号的隔离。

③ 功率变换模块(power converter)。功率变换模块对电机电流进行控制。电动汽车经常使用的功率器件有大功率晶体管、门极可关断晶闸管、功率场效应管、绝缘栅双极晶体管以及智能功率模块等。

(2) 电机控制器使用以下传感器来提供驱动电机系统的工作信息。

① 电流传感器:用以检测电机工作的实际电流(包括母线电流、三相电流)。

② 电压传感器:用以检测提供电机控制器故障的实际电压(包括动力电池电压、12 V 蓄电池电压)。

③ 温度传感器:用以检测电机控制系统的工作温度(包括 IGBT 模块温度、电机控制器板载温度)。

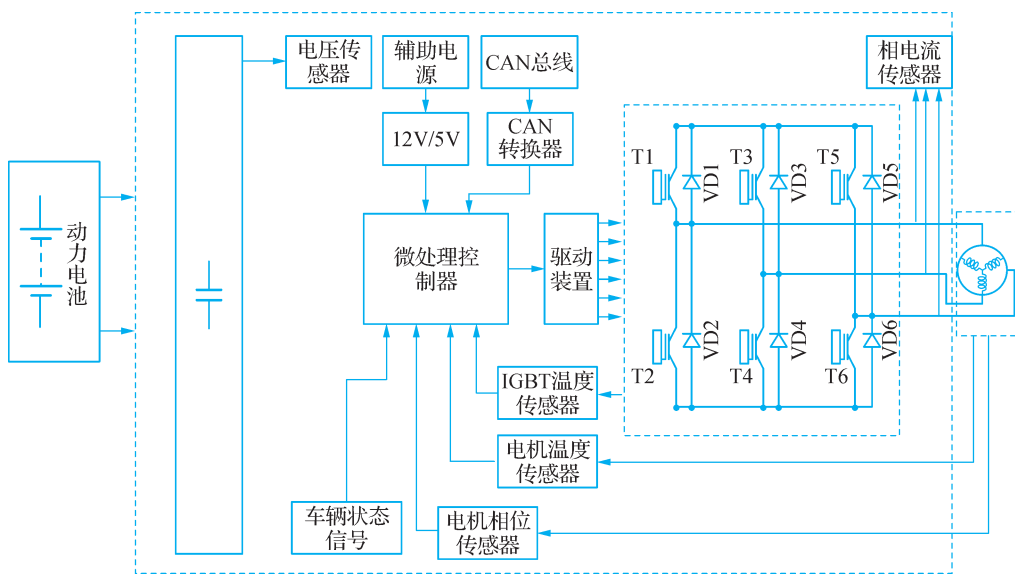


图 1-41 电机控制器设计原理

二、电机控制器基本功能

(1) 电压转换:MCU 将电池的直流电转换为三相交流电,驱动交流电机,这一过程通过内部逆变器实现,使用半导体开关器件如晶体管或 IGBT 来控制电流的频率和幅值。

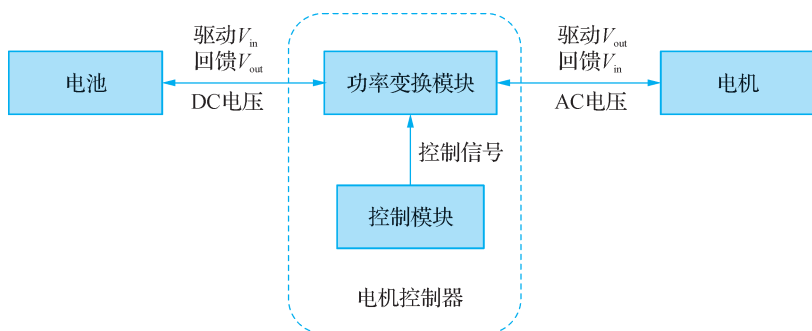


图 1-42 电机控制器电压转换原理

(2) 速度与转矩控制: MCU 根据驾驶条件调整电机转速和转矩, 以适应不同的驾驶需求。

(3) 系统保护: MCU 具备多种保护机制, 如电池输入端保护、故障检测、电机控制器本体故障保护、过载保护等, 以确保系统的安全和稳定运行。

(4) 诊断与反馈: MCU 能够实时监测系统状态, 向车辆的其他控制系统提供反馈, 如电池状态、电机温度、控制器温度等。

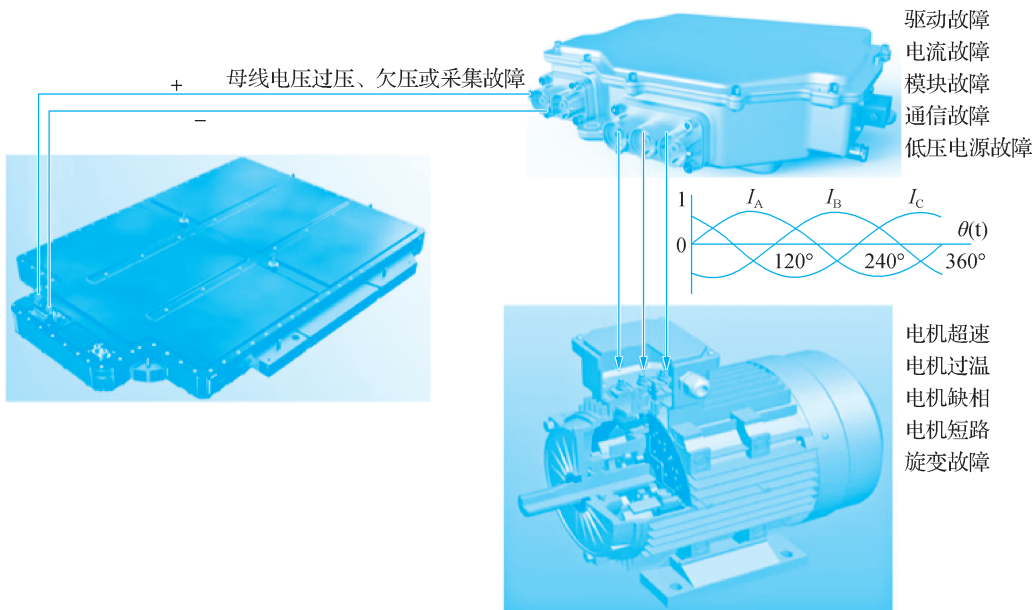


图 1-43 电机控制器故障诊断原理

(5) 通信接口: MCU 具备与其他系统(如电池管理系统 BMS、车载信息娱乐系统等)的通信能力, 实现数据共享和系统协同。

(6) 热管理: MCU 包含温度传感器和冷却系统, 确保在高负载条件下维持适宜的工作温度。

(7) 电磁兼容性: MCU 设计考虑了电磁兼容性(EMC), 以减少对车辆其他电子系统的影响。

(8) 模块化设计: MCU 可能采用模块化设计, 便于维护和升级。

(9) 启动/停止电机: MCU 能够控制电机的启动和停止, 启动时逐渐增加电流, 停止时



逐渐减少电流。

(10) 改变电机旋转方向: MCU 可以改变电流方向, 从而改变电机旋转方向。

(11) 再生制动: MCU 在制动过程中控制电机作为发电机运行, 将动能转换回电能存储在电池中。

通过这些功能, MCU 不仅确保了电动汽车的高效运行, 还提高了驾驶的安全性和舒适性, 是现代电动汽车不可或缺的关键组件。

注释 通过二极管的整流原理, 制动能量回收时, 将交流电转换成直流电反充至电池中。

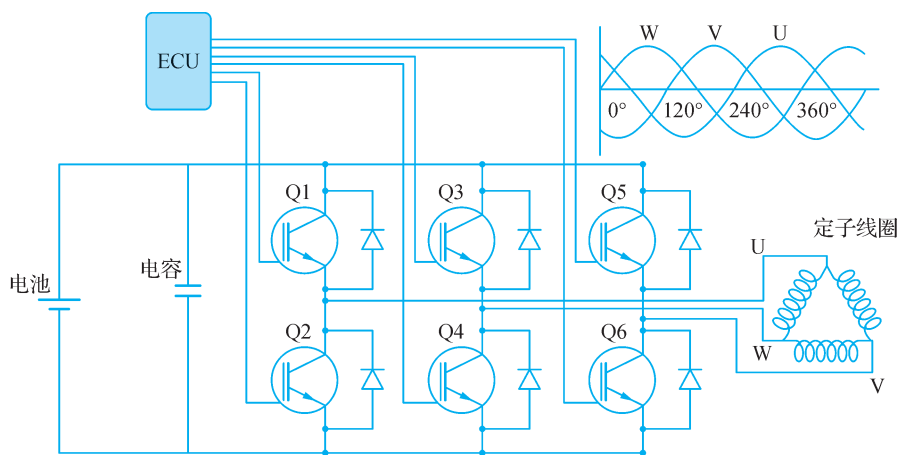


图 1-44 电机控制器工作原理

三、典型电机控制器

1. 比亚迪 E5 电机控制器

比亚迪 E5 的高压电控总成是一个高度集成的部件, 它融合了纯电动汽车的四大核心高压电控装置: 双向交流逆变式电机控制器 (VTOG)、车载充电器 (OBC)、高压配电箱以及 DC-DC 转换器, 这一集成设计被业内形象地称为“高压四合一”。

(1) VTOG 控制器

作为电压型逆变器, VTOG 控制器利用 IGBT 技术将直流电高效转化为交流电。其核心功能在于根据挡位信号、加速踏板信号及制动踏板信号等精准控制电机运行, 包括电机的正反转、功率输出、扭矩调节及转速控制等, 从而确保车辆的正常行驶与操控。此外, 该控制器还具备充电控制功能, 能够实现交直流之间的顺畅转换以及双向充放电控制。从结构上看, VTOG 控制器由上、中、下三层单元组成, 其中上层和下层分别负责电机控制和充电控制, 而中间层则专注于水道冷却功能。

(2) 车载充电器

车载充电器是专为纯电动汽车设计的固定充电设备。它能够根据高压电池管理系统 (BMS) 提供的数据动态调整充电电流和电压参数, 从而确保充电过程的安全与高效。



(3) 高压配电箱

高压配电箱在整车电气系统中扮演着至关重要的角色。它负责将高压电池的高压直流电分配给整车的高压电器,并接收来自车载或非车载充电器的直流电为高压电池充电。同时,高压配电箱还具备电流检测、漏电监测等多项辅助功能,为整车电气安全提供坚实保障。

(4) DC-DC 转换器

作为电动汽车动力系统的重要组成部分,DC-DC 转换器承担着为低压电池充电的关键任务。它与低压电池协同工作,为低压电器系统提供稳定可靠的电力供应。

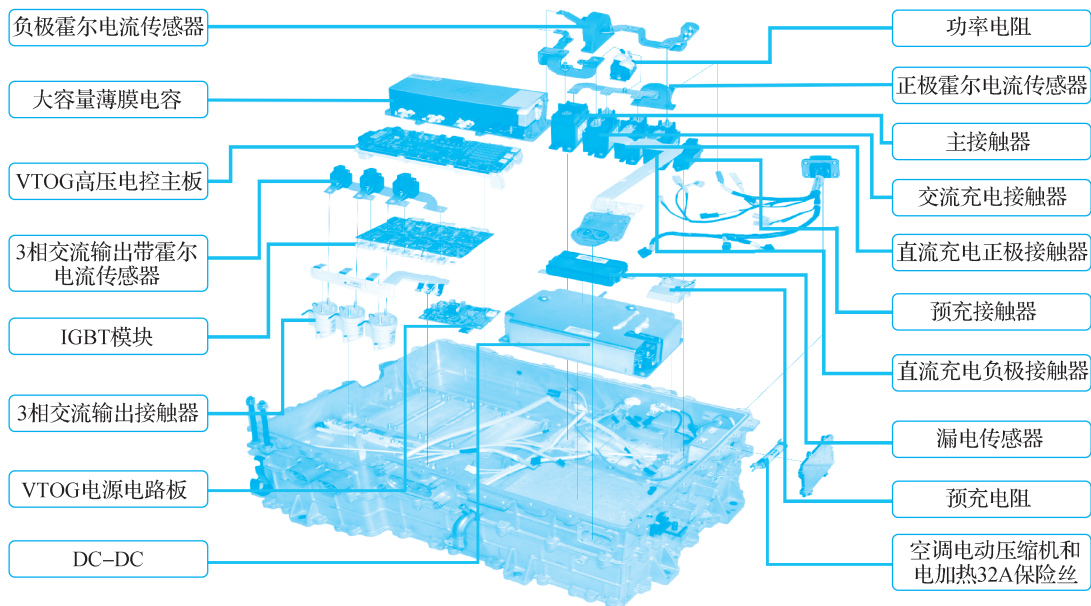


图 1-45 比亚迪 E5 四合一



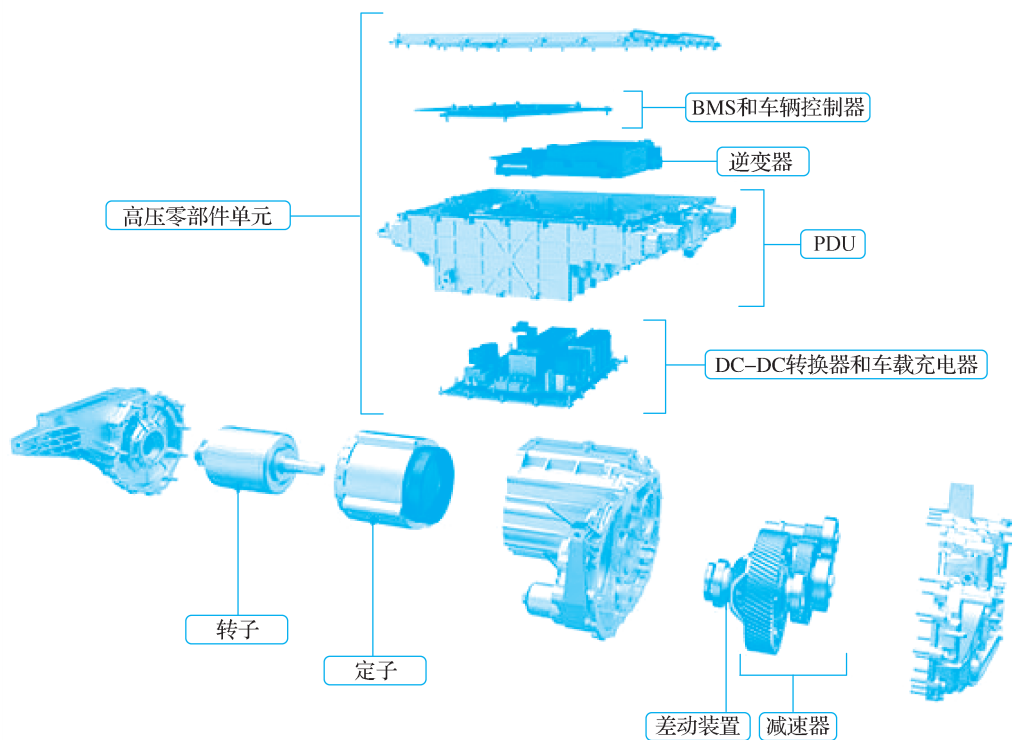
图 1-46 比亚迪 E5 大电容

2. 比亚迪八合一电驱动系统

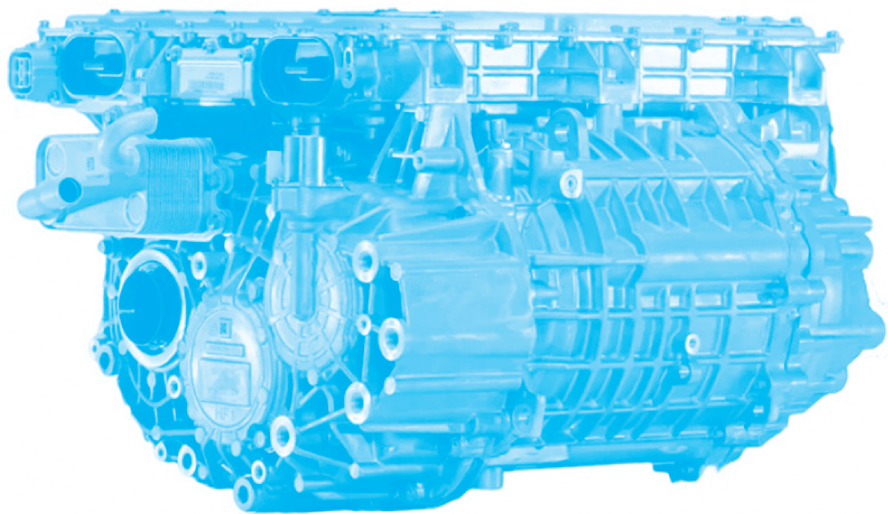
比亚迪八合一电驱动系统装配在海豚和元 PLUS 车型上,主要包含以下重要组成部分:驱



动电机、减速器、驱动电机控制器、高低压直流转换器(DC-DC)、双向车载充电器(OBC)、高压配电箱(PDU)、电池管理器(BMS)、整车控制器(VCU)八大模块。整合的目的是“有效利用车内空间,降低成本,实现轻量化”。外形尺寸(标称值)为车辆前后方向591.3 mm×宽度方向612.2 mm×高度方向360 mm。虽然把八种零部件合为一体,给人的印象却很紧凑。标称质量为104~106 kg,实际测量结果为114 kg。



(a)



(b)

图 1-47 比亚迪八合一电驱动

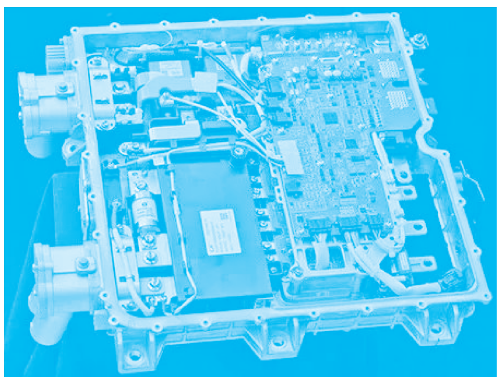


图 1-48 高压单元上侧集成了逆变器、BMS、车辆控制器

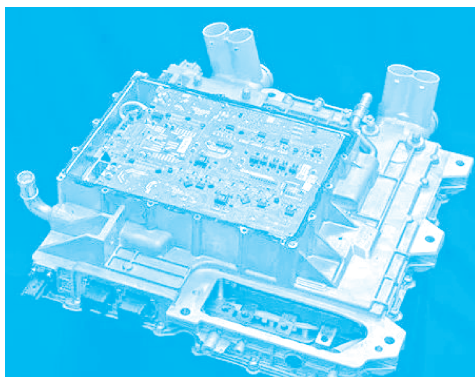


图 1-49 高压单元下侧集成了 DC-DC 转换器和车载充电器

系统的集成需要更高的技术,更高的门槛,也就意味着必然会有可取的优势,在八合一的电驱中最明显的优势有以下几个:

(1) 八合一电驱总成较上一代的三合一系统,功率密度提升 20%,整机重量和体积分别降低 15%、20%,系统综合效率达到 89%。

(2) 高度的集成在一定程度上也可以缩短系统的响应时间,取消了直流母线和前舱安装支架,体积更小。

(3) 系统所需零部件的降低,自然也就带来了整体成本的下降,合成之后的成本相比之前分离的方案,可以明显地产生成本上的优势,这也是当下竞争激烈的市场环境下必然的发展趋势。

八合一电驱的缺点:

(1) 很明显八合一之后整个的系统会变得更加复杂和庞大,那么在车辆布局中多少会有所约束,布置起来不会那么灵活,需要整体地考虑其布局的可能性;

(2) 再者集成之后,对于这种电驱动高功耗的部件,必然会产生大量的热量,如何进行热管理也是一个不小的挑战;

(3) 集成之后,电器部件距离较近,空间狭小,有没有可能会存在 EMC 的问题,在设计阶段也需要重点考虑;

(4) 最后,大的系统集成都可能面临的一个问题,故障率会不会提高,越复杂的东西越容易出现故障。

3. 奥迪 e-tron 三合一动力总成

奥迪 e-tron 电动 SUV 的电机驱动功率逆变器由上盖、控制电子装置、12 V 接口、高压直流电接口、通向定子绕组的交流电接口、壳体和密封件组成。奥迪 e-tron 电动 SUV 高压功率电子控制器通过密封件和交流接口与驱动电机连接。

驱动板上有高压部分和低压部分,板上有明显的隔离带,驱动部分包括:驱动电源、高压采样和驱动电路。驱动电路是将控制板输出的驱动信号带载能力加强,驱动 IGBT,并将故障信号反馈给控制板。

奥迪 e-tron 采用了“双极性电池技术”逆变器,这一创新的电力转换方法使得逆变器能够高效处理高电压范围,实现最佳功率输出,同时最大限度地减少能量损耗。e-tron 的逆



变速器不仅提升了车辆的续航能力,也体现了奥迪对推动可持续移动解决方案的坚定承诺。

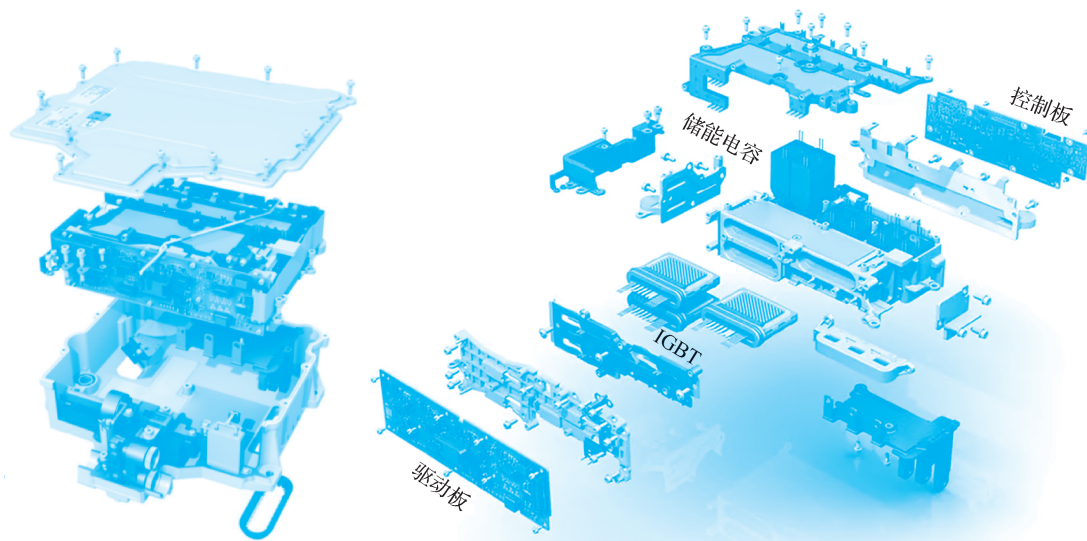


图 1-50 奥迪 e-tron 高压功率电子控制器结构

4. 大众 ID.4X 电驱动系统

大众 ID.4X 电驱动系统的功率和控制电子装置 A49 安装在三相电流驱动装置上,对三相电流驱动装置进行调控,并对驱动电机 DC/AC 转换器进行控制,以产生三相交流电压。

电驱动控制单元安装在电驱动系统的功率和控制电子装置 A49 中,不能单独更换。主要功能是:执行驾驶员要求、监测三相电流驱动装置的温度、识别转子位置。

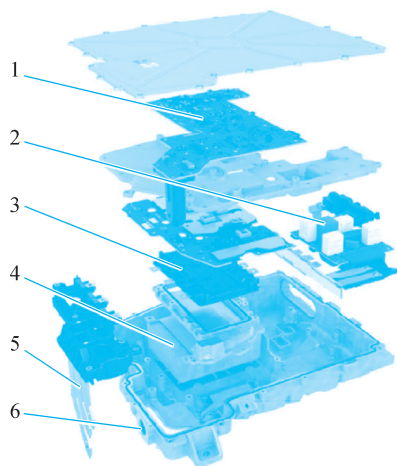


图 1-51 ID.4X 电驱动系统的功率和控制电子装置

1-电驱动控制单元 J841;2-EMC 和抑制滤波;3-驱动电机 DC/AC 转换器 A37;4-中间电路电容器 C25;5-电动机 V141 的连接口;6-冷却液接口。



5. 特斯拉电机控制器

从 PCB 板对比,特斯拉第四代电驱动系统比 Model3 结构上更加紧凑。

特斯拉的 Model 3 整个板子集成了控制板和驱动板,上面既有高压也有低压,主控芯片 DSP 的型号是 TMS320f28377,反激电源控制部分的芯片是 TPS40210,有六个型号是 STGAP1AS 驱动芯片,用于驱动三相的碳化硅的开关管。板子中间有 50 个电阻组成的被动放电电阻,当整车停车后,用于泄放母线电容中的残余电荷。板子下部有 U、W、V 三相铜接线柱,两边接线柱上有测量 U 相和 W 相电流大小的霍尔传感器。母线电容主电容是 $550\ \mu\text{F}$,两个 $0.68\ \mu\text{F}$ 的 Y 电容。母线电容主要是储能滤波作用,UWV 三相的碳化硅的驱动桥是由 24 个并联的 SiC MOSFET 芯片组成,并安装在销钉式散热器上,以实现高电流输出(800Arms)。通过激光焊接工艺,每个 SiC MOSFET 都连接到铜母排上,这极大地提高了连接的可靠性。在驱动桥上有屏蔽 EMC 的铜护罩,驱动桥在工作过程中会产生很大热量,在壳体背面需要冷却散热,有专用的冷却水道。

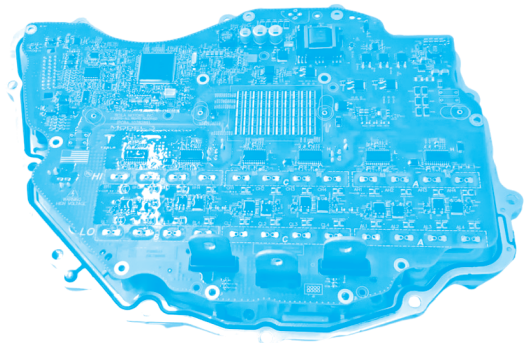


图 1-52 Model 3 后驱总成逆变器 PCB

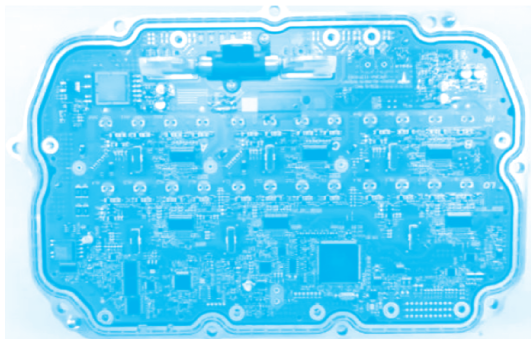


图 1-53 第四代电驱总成逆变器 PCB

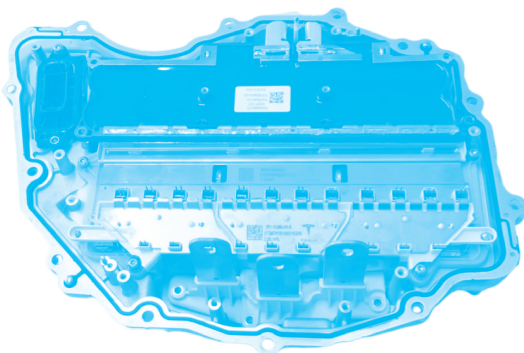


图 1-54 Model 3 母线电容

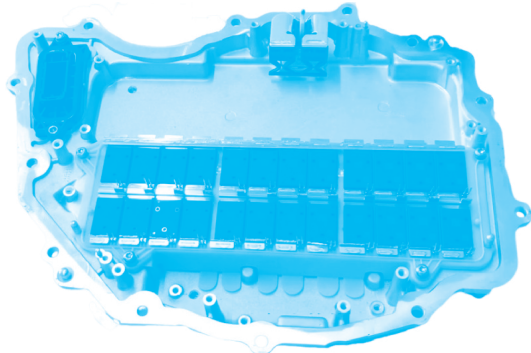


图 1-55 UWV 三相的碳化硅的驱动桥

Model 3 搭载了一项创新技术——全碳化硅(SiC)逆变器。这一先进技术相较于传统硅基逆变器,在效率、重量和热管理方面均有显著提升。特斯拉独有的 SiC 逆变器技术不仅减少了功率损耗,还显著提升了车辆的续航能力,使其在能效方面成为行业领导者。

6. 众泰云 100S 电动机控制器

众泰云 100S 电动汽车电机控制器采用 MC3336 系列低压交流控制器,该类型控制器是



一款应用于低压交流电动车辆的驱动器,采用了国内外一流的交流电机控制器算法,实现了对交流电机宽调速范围内转矩的精准控制。

交流驱动系统可以实现更宽的电机调速范围,从而提高了车辆的行驶速度;交流电机无碳刷、全密闭、免维护,系统可靠性大大提高;交流系统能达到更高的效率,实现灵活的能量回馈控制,从而有效地提升续航里程。

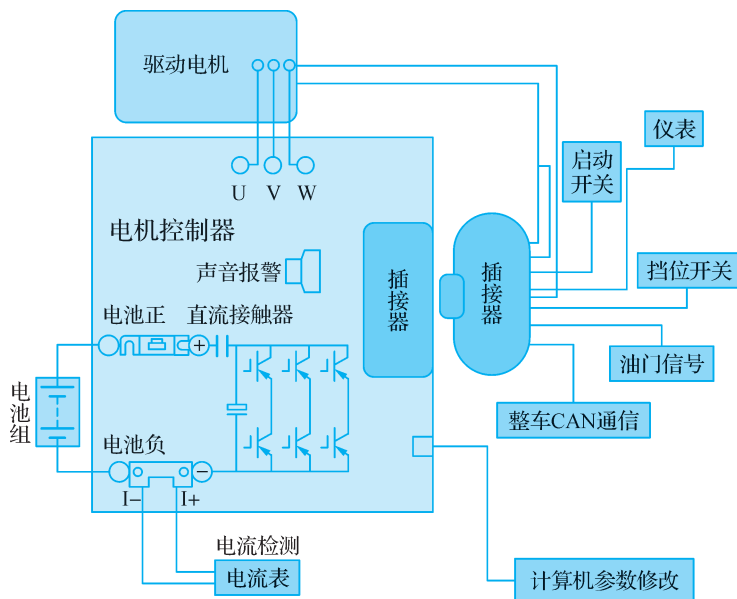


图 1-56 众泰云 100S 电动汽车电机控制器原理

7. 新能源电机实训台电机控制器

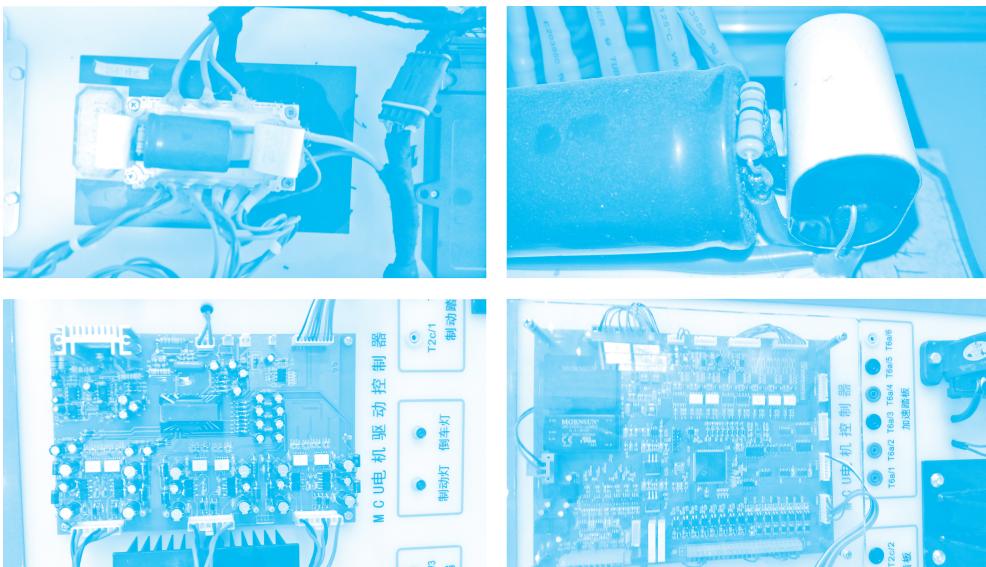


图 1-57 实验台架用的电容、电机控制器、电机驱动器



三、逆变器的结构原理

在新能源汽车中,驱动电机及储能装置无疑是最关键的组成部分,但还有一项关键装置容易被忽视——逆变器,无论是在搭载永磁同步电机的车型上,抑或是搭载三相异步电动机的车型上,逆变器都作为关键部件而存在。

而逆变器如此重要的原因则在于锂离子电池输出直流电,在向使用交流电的电机供电时,必须进行转换,以满足电动汽车对动力系统的需求。

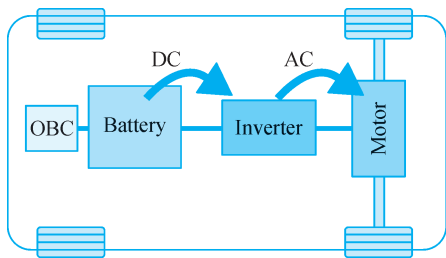


图 1-58 逆变器作用

1. 逆变器的电路构成

逆变器主要由功率开关器件、控制芯片和滤波电路等组成。功率开关器件通常采用 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)或 MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管),它们具有高效率、低噪声和可靠性等优点,能够实现高频开关和高电压输出。控制芯片负责对逆变器进行电压和电流的监控和控制,保证逆变器的稳定运行。滤波电路用于滤除逆变器输出中的谐波和电磁干扰,提高输出波形的质量。

逆变器由下述电路构成:

(1) 噪声滤波器:抑制来自外部或者来自该电路的噪声,并防止电路误工作。滤波器通常组合使用大型电感器和薄膜电容器。



图 1-59 常见电容

(2) 电压测量:为控制转换电路而进行电压测量。在电压测量的电路中,为了进行电压转换电路的控制而测量输入的电压。测量时通常将多个电阻器连接起来以测量电阻器两端的电压。

(3) 电压转换电路:在电压转换电路中,通过多个开关元件来进行电压的转换。

由于开关时的输入电压变动会导致噪声,所以使用大型的薄膜电容器来进行噪声抑制和平滑化。此外,在车辆停止后,如果不释放储存在大型薄膜电容器中的电能,则可能会导



致误工作,因此通常会连接电阻器来进行放电。

通过令开关元件 On/Off 来执行转换操作,但由于元件 On/Off 时会产生噪声,因此在元件栅极端子上使用电阻器来抑制驱动噪声。

此外,开关元件等会因在高功率下工作而成为高温状态,为了防止产生规定以上热量时造成故障,通常会使用 NTC 热敏电阻器来进行温度测量。



图 1-60 霍尔电流传感器

(4) 电流测量:为控制转换电路而进行电流采样。采集电机端的三相电流信号和位置信号,以实现实时监测。电流传感器一般采用霍尔效应传感器或空心穿孔式传感器。

(5) 控制电路:控制电路是电机控制器的大脑,负责信号采集和控制算法实现。它通常包括微控制器或数字信号处理器(DSP)以及相关支持电路,用于处理信号

采集的数据,并生成相应的 PWM 信号。

(6) DC/DC 转换器:向控制电路供给电源。在 DC/DC 转换器电路中,为了去除输入部的噪声和使得输出部平滑,通常使用导电性聚合物混合铝电解电容器,为了进行电压转换,通常使用车载用功率电感器。

(7) 通信 I/F:与外部的通信电路。在通信 I/F(通信)电路中,使用两根线与外部设备(CAN、Ethernet 等)进行通信。此时,如果噪声或静电从通信线混入,则可能会导致收发器 IC 故障。

因此,收发器电路中静电预防装置通常由片式压敏电阻器构成。

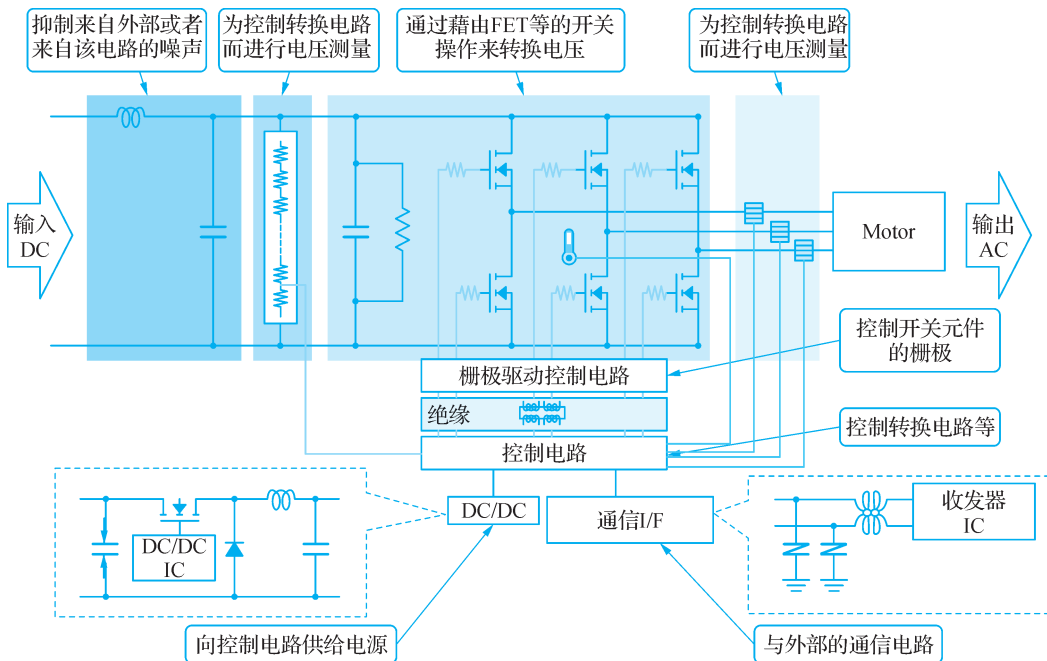


图 1-61 逆变器的总体构成



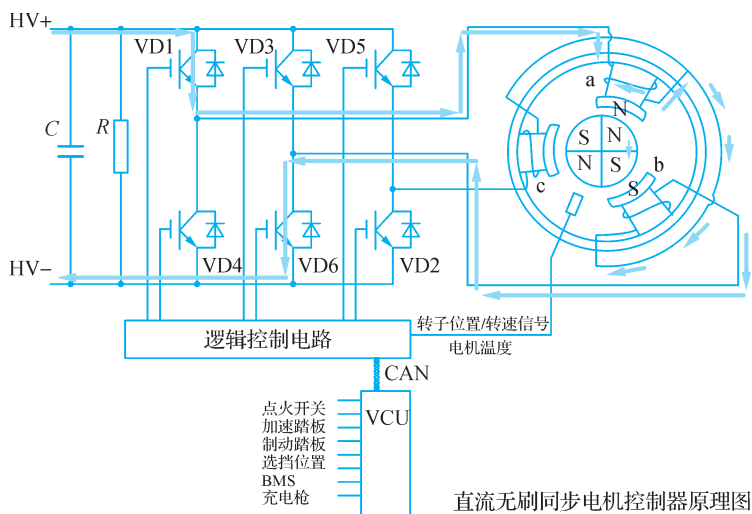
2. 逆变器工作原理

从工作原理上来看,逆变器的基本原理十分简单,通过在电源与负载之间设置两组开关,改变经过负载的电流方向。

逆变器的工作原理是依靠 PWM(脉冲宽度调制)技术,通过快速开关控制开关管的导通和关闭时间来控制输出电压和电流的大小。通过调整开关管的导通时间与关闭时间的比例,可以实现不同电压和电流的输出。同时,逆变器还可以通过控制开关管的频率来调节输出功率,以满足不同驾驶条件下对电动汽车动力的需求。

(1) VD1→VD6 导通

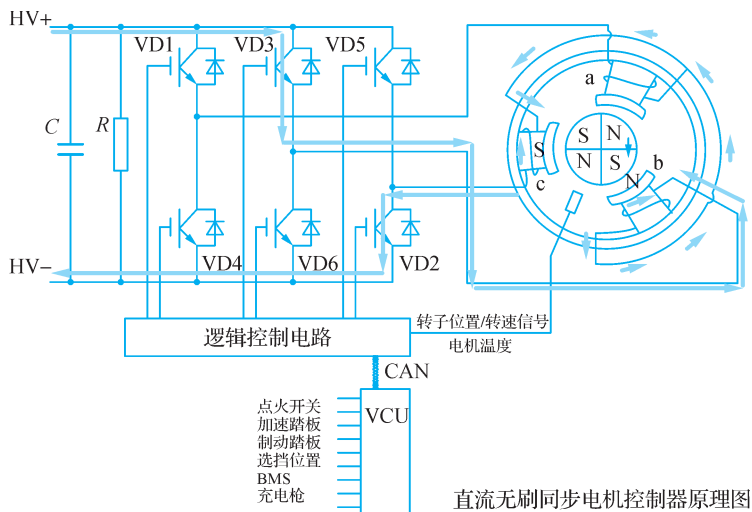
某时刻,电流从 HV+ 经过 VD1 到达 a、b,从 VD6 流回到 HV-。



(a) VD1→VD6 导通

(2) VD3→VD2 导通

某时刻,电流从 HV+ 经过 VD3 到达 b、c,从 VD2 流回到 HV-。

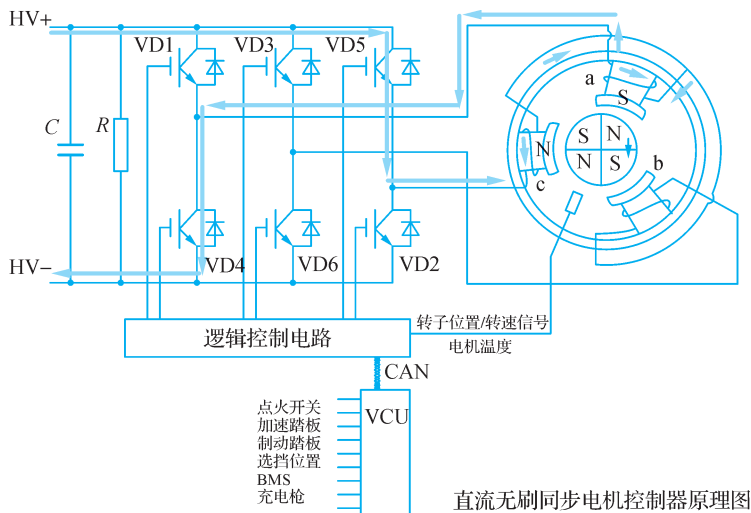


(b) VD3→VD2 导通



(3) VD5→VD4 导通

某时刻,电流从 HV+ 经过 VD5 到达 c、a,从 VD4 流回到 HV-。



直流无刷同步电机控制器原理图

(c) VD5→VD4 导通

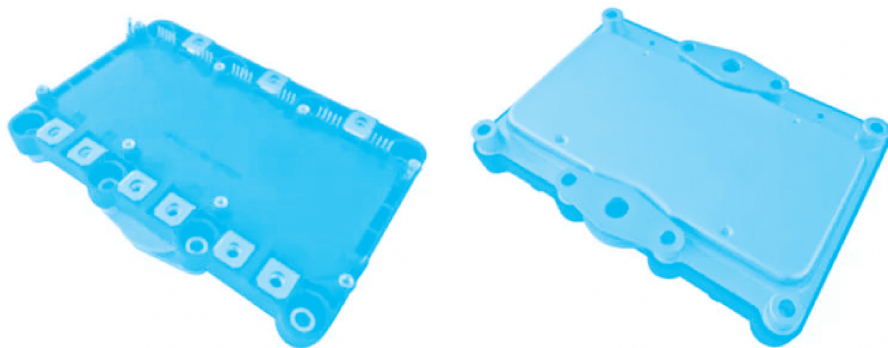
图 1-62 逆变器工作原理

3. 逆变器的组件及功用

逆变器作为电动汽车动力系统的关键组件,其内部包含多个重要部分以确保高效、稳定的电力转换。以下是逆变器的核心组件及其功能:

(1) IGBT 电功率器件

- ① 作为开关设备,响应驱动信号来操作功率模块。
- ② 在高电流和高速条件下运行,满足车辆的高性能需求。
- ③ 在高电压架构的车型中,正逐渐从 IGBT 向 SiC 技术过渡。



(a) 正面

(b) 背面

图 1-63 集成功率模块

(2) 高压直流线路电容器

用于滤波波形,减少电机纹波电流,提高电流质量。

(3) 主电路母线

作为导电路径,在逆变器组件之间分配电力,提供灵活且高效的电力传输。



(4) 功率模块驱动电路板

负责控制 IGBT 的输入操作,以相应地调整功率输出。

(5) 电机控制电路板

执行矢量控制操作,确保电机对各种车辆操作(如起动、停止、加速和减速)的响应。

(6) 直流和大电流交流连接器

作为逆变器前后连接的组件的入口和出口,确保电力在系统中顺畅流动。

(7) 散热片

① 在逆变器运行期间,通过散热来降低高温,确保高性能条件。

② 使用先进的散热技术,如双液冷却,不断提高冷却性能。

这些组件共同协作,确保逆变器在电动汽车中起到关键作用,实现高效、稳定的电力转换和能量回收,为驾驶者提供卓越的驾驶体验。

随着电动汽车技术的持续进步,逆变器系统也在不断经历创新。当前的研发重点在于减轻逆变器重量、提升其工作效率以及改善热管理性能。从传统硅半导体向碳化硅(SiC)半导体的转变正成为行业发展的新趋势,得益于 SiC 材料的卓越电学特性。基于 SiC 的逆变器能够在更高温度下稳定运行,这不仅优化了热性能,也提高了整个动力系统的综合效率。这些技术的突破和创新,预示着电动汽车未来的发展前景将更加光明。

4. IGBT 短路测量

车辆正常下电后,断开 12 V 电池的负极。确认 CIDD 高压母线电压在人体安全电压范围内。万用表选用二极管挡位。

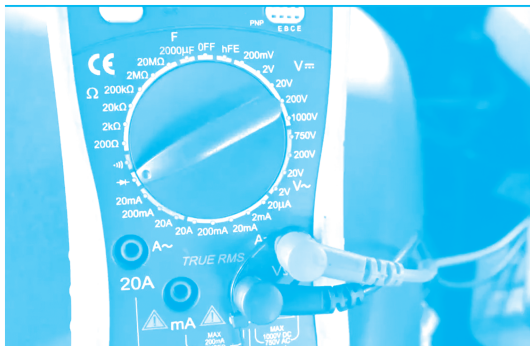


图 1-64 万用表选用二极管挡位

万用表负极接 CIDD 高压母线端子正极,用万用表的正极分别接 U、V、W 三相,万用表三次读数应该在 0.39 ± 0.03 V,若有读数值为 0,应为短路。



图 1-65 万用表负极接高压母线端子正极,正极分别接 U、V、W 三相



万用表正极接 CIDD 高压母线端子负极,用万用表的负极分别接 U、V、W 三相,万用表三次读数应该在 0.39 ± 0.03 V,若读数值为 0,应为短路。



图 1-66 万用表正极接高压母线端子负极,负极分别接 U、V、W 三相

四、旋转变压器

新能源汽车上的驱动电机目前多采用永磁同步电动机。在工作时,外部旋转磁场与内部转子需同速旋转,且旋转磁场的磁极与转子磁极之间要保持一定的夹角。因此,电机控制器必须实时监测转子的位置和转速,这时位置传感器就扮演了关键角色。位置传感器主要有电磁式(如旋转变压器)、光电式(如光电编码器)和磁敏式(如霍尔位置传感器)。其中,旋转变压器作为电动汽车驱动电机的核心部件,负责感知电机转子的位置和速度,并将这些信息转换为信号反馈给电机控制系统,从而实现电机的精准操控。其精度不仅影响整车的能耗和驾乘体验,更关乎整车的可靠性及乘客安全。

旋转变压器的历史,可以追溯到 20 世纪 60 年代。由于早期旋转变压器的信号处理电路相对复杂且价格高昂,它的使用场景受到了一定程度的约束。然而,它无可比拟的可靠性和高精度特点,在多个关键领域如军事、航天、航空、航海等仍占据核心地位。随着电子工业的快速发展,电子元器件的集成度不断提高,带来了成本的显著降低。同时,信号处理技术的进步极大地简化了旋转变压器的信号处理电路,在提高可靠性的同时也大幅降低了成本。此外,软件解码技术的引入进一步提升了信号处理的灵活性和便捷性。新能源汽车行业的快速进步也为旋转变压器带来了更广阔的应用空间,使其优势得到进一步的发挥。

1. 旋转变压器结构和工作原理

(1) 结构

旋转变压器简称旋变,又称同步分解器,依据电磁感应原理工作,用来测量旋转物体的旋转角度与角速度。旋变由定子绕组与转子组成,定子通常固定在电机轴端壳体上,转子固定在电机输出轴端。定子绕组通常有 6 个引脚。其中两个脚作为励磁信号输入,一般由采集控制器固定输入一个正弦电信号(10 kHz)来提供励磁电流,其余两组引脚作为返回绕组,当电机旋转时产生感应电动势,一般一组为正弦电信号,一组为余弦电信号。

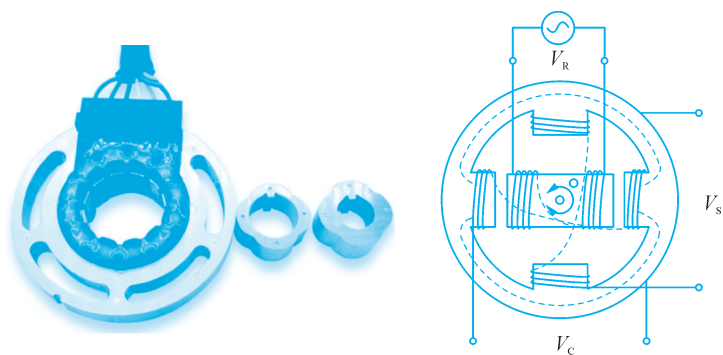


图 1-67 旋转变压器的结构

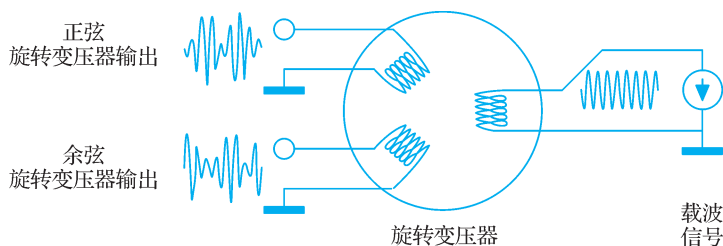


图 1-68 载波信号即为励磁信号

旋转变压器的工作原理和普通变压器基本相似,区别在于普通变压器的原边、副边绕组是相对固定的,所以输出电压和输入电压之比是常数,而旋转变压器的原边、副边绕组则随转子的角位移发生相对位置的改变,因而其输出电压的大小随转子角位移而发生变化,并与之保持一定的函数关系。

旋转变压器常用于电动汽车的位置、速度传感器。例如,驱动用电动机和发电机的位置传感器、电动助力方向盘电机的位置传感器、燃气阀角度测量等,都采用了旋转变压器。但旋转变压器形式多样,而磁阻式旋转变压器因其工艺性好、相对位移大、可靠性高、低成本而被广泛应用于电动汽车。

磁阻式旋转变压器:一相励磁绕组和两相输出绕组固定在定子槽内,转子磁极形状特殊设计,使得转子在旋转时,由气隙的变化使得两相输出绕组信号成正余弦关系。

(2) 工作原理

励磁绕组(也称激励绕组 R_1-R_2)与两相正交的返回绕组(S_1-S_2 、 S_3-S_4),如图1-69所示。

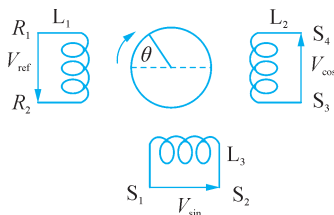


图 1-69 励磁绕组与两相正交的返回绕组



当励磁绕组通以高频的激励信号后,返回绕组会感应出一定幅值和频率的电压信号,其输出电压是由正弦包络的高频信号,包含了转子位置信息。旋变的输入输出电压之间的关系如图 1-70 所示。

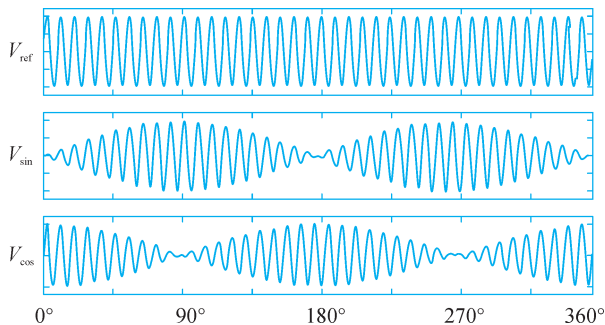


图 1-70 旋变的输入输出电压之间的关系

V_{ref} 为励磁信号波形(即 R_1 与 R_2 端输入电压),其公式为:

$$\text{励磁输入: } V_{\text{ref}} = E \times \sin(\omega t) \quad (1-1)$$

$$\text{正弦输出: } V_{\text{sin}} = K \times E \times \sin(\omega t) \times \sin \theta \quad (1-2)$$

$$\text{余弦输出: } V_{\text{cos}} = K \times E \times \sin(\omega t) \times \cos \theta \quad (1-3)$$

其中, θ 为旋变转子角度; ω 为励磁载波频率; E 为励磁输入峰值电压; K 为转换比例。

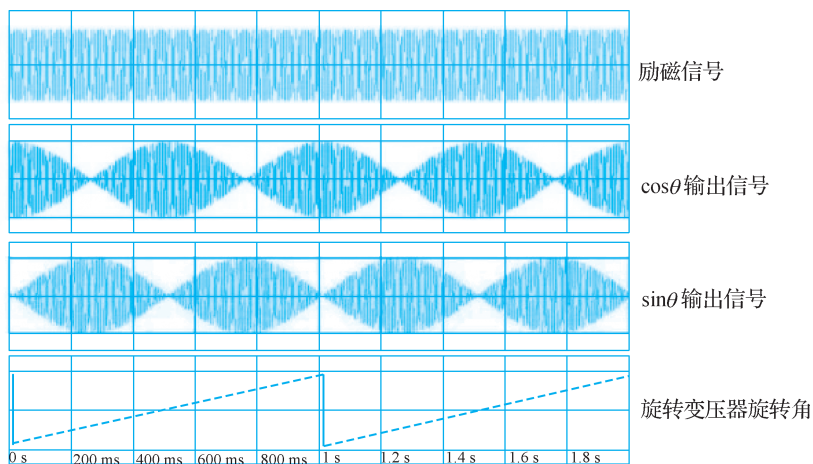


图 1-71 信号关系图

当需要求解当前转子位置角度时,只需要将公式(1-2)与公式(1-3)相比便可得到:

$$\tan \theta = V_{\text{sin}} / V_{\text{cos}} \quad (1-4)$$

然后将式(1-4)反正切便得到转子角度值。如果要求解当前转子转速,对其角度 θ 对时间求微分即可。(具体解算过程以实际应用为准)

2. 旋转变压器的种类

旋转变压器按照输出绕组的电压幅值与转子转角的函数关系分为正余弦旋转变压器、线性旋转变压器、比例式旋转变压器;按照极对数的多少可以分为单对极旋变和多对极旋



变;按照有无电刷和滑环可分为接触式旋变和无接触式旋变两种;按照转子上有无绕组可以分为无刷旋转变压器和磁阻式旋转变压器。下面介绍两种常见的类型。

(1) 正余弦旋转变压器

从上述中可以看出,当一次绕组完成一整周(360°)的旋转时,每个电压输出波形均会与两个特定的角度位置相对应,且这两个位置的角度和恒定为 360° 。为了消除这种位置对应关系的不确定性,我们采用了同时使用两个相互垂直的二次绕组的方法。这两个绕组的输出电压间存在 90° 的相位差异,其中一个绕组的输出波形外轮廓呈现为正弦($\sin$)曲线,而另一个绕组则展现出余弦($\cos$)曲线的外轮廓。通过综合利用这两条电压曲线,我们可以精确地反推出一次绕组的唯一旋转位置。这种特殊设计的旋转变压器被称作正余弦旋转变压器,它代表了旋转变压器的一种基础构型。在这里,一次绕组也被称为励磁绕组,而两个二次绕组则分别被命名为正弦绕组和余弦绕组。

(2) 磁阻式旋转变压器

磁阻式旋转变压器可以看成是一种输出电压与转子转角保持一定函数关系的感应式微电机,由定子和转子构成,如图 1-72 所示。

① 定子。在磁阻式旋转变压器中,一次绕组与二次绕组均被精心安装在定子铁芯内圆面的独特凸极之上(当励磁线圈通电后,这些凸极即成为磁极),且所有绕组均稳固不动。一次绕组(亦称为励磁绕组或输入绕组)中输入的是正弦励磁电流,而两相二次绕组(也被称为信号绕组或输出绕组)以相互垂直的方式配置,从而产生输出信号。旋转变压器的定子由铁镍软磁合金或由冲有特定槽孔的硅钢片层层叠加而成。值得注意的是,旋转变压器的定子与转子的磁极数目并不相同,定子的磁极数目多于转子。定子部分被牢固地安装在电机的壳体之上。在定子铁芯的凸极上,一次绕组采用逐极反向串接的方式,而两相二次绕组则以两个磁极为间隔进行反向串接。

② 转子。在磁阻式旋转变压器中,转子部分并未配置绕组,而是完全由铁芯构成,其所用材料与定子铁芯相同。转子的铁芯外圆面上分布着凸极。为了确保气隙磁场近似为正弦形状,并满足特定的极数要求,转子凸极的形状需经过精心设计。通常情况下,转子会采用两对极(2X)或更多极的形状。显然,转子的形状不仅决定了极对数,还定义了气隙磁场的形态。磁阻式旋转变压器通常采用分装式设计,各部分并不组合在一起。转子被安装在电机的转轴上,与电机保持同步旋转。

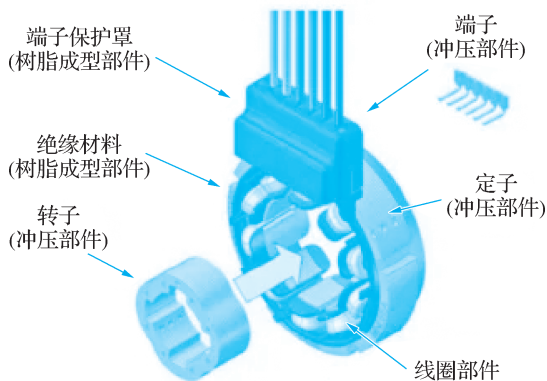


图 1-72 磁阻式旋转变压器



在工作状态下,一次绕组会接入频率低于 10 kHz 的正弦交流电源,以此作为励磁信号。当转子相对于定子发生旋转时,定子与转子间的气隙及磁阻会经历持续的变化。每当转子转过一个凸极,气隙和磁阻就会完成一个周期的变化。当转子完成一整周的旋转时,气隙和磁阻的变化周期数便与转子的凸极数目相等。这里,转子的凸极数目实质上等同于磁阻式多极旋转变压器的极对数。有资料显示,旋转变压器的极对数与被测电机的极对数是一致的。气隙和磁阻的变化会进一步引起一次绕组和二次绕组之间互感的变化,从而使得二次绕组所感应到的电势也随之发生变动。基于磁阻变化的原理,两相二次绕组上会分别感应出电压信号,这些信号的频率是恒定的,但幅值的外包络线会呈现出正弦和余弦的形态,并且这些信号会随着转角的变化而按正弦规律变化,两者之间保持着 90° 的电角度差。电机控制器的解码芯片能够依据这些正弦和余弦规律的变化,来精确判断转子的转角(即其瞬间位置)、转速以及转向。

3. 主要参数和性能指标

(1) 零位电压

在旋转变压器的运行过程中,当输出绕组中的感应电压达到最小值时,转子所处的位置被定义为电气零位,此时输出的电压即为零位电压,亦称剩余电压。理论上,理想的旋转变压器应具有零值的零位电压。然而,在实际应用中,由于绕组分布误差、交轴非严格正交、导磁材料磁导率不均、磁路不对称以及外部干扰等因素的存在,旋转变压器的零位电压往往不为零。通常,为了保障系统的稳定性和准确性,旋转变压器的零位电压应被控制在最大输出电压的 0.1% 以下。此外,零位电压中的基波电压成分通常占据较大比例,因此,对零位电压的准确测量成为评估旋转变压器性能的关键环节之一。

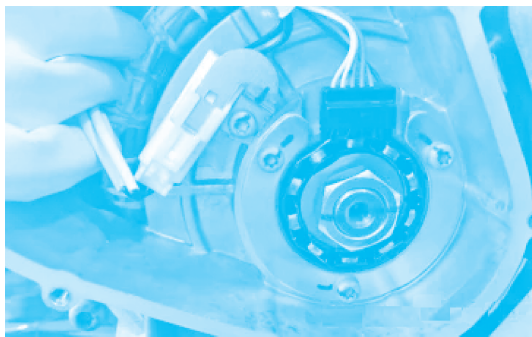


图 1-73 零电位测试

(2) 相位移

相位移,指的是旋转变压器励磁电压与输出电压的基波分量之间的相位差异。在理想情况下,旋转变压器的相位移通常是超前的。对于控制系统而言,一定程度的相位移稳定性至关重要。当相位移保持在相对固定的范围内时,系统可以正常运行;然而,较大且不稳定的相位移可能导致系统性能下降甚至失效。在实际应用中,相位移的大小受多种因素影响。一般而言,随着旋转变压器基座号的上升和励磁频率的增加,相位移会相应减小。这是因为基座号和励磁频率的增加通常意味着更高的旋转速度和更短的响应时间,从而减少了相位延迟。另一方面,温度的上升也是影响相位移的重要因素。

随着温度的上升,旋转变压器的绕组电阻会增大,这会导致电流通过绕组时产生的磁场



发生变化,进而引起相位移的增加。因此,在设计和使用旋转变压器时,必须充分考虑温度对相位移的影响,并采取相应的措施进行补偿或控制。在控制系统中,为了确保系统的稳定性和准确性,通常需要将相位移或相位移的变化控制在一定的范围内。这可以通过优化旋转变压器的设计、选择合适的基座号和励磁频率以及采用适当的温度补偿措施来实现。通过这些措施,可以有效地减少相位移对系统性能的影响,提高系统的整体性能。

(3) 变压比

旋转变压器的变压比与静止变压器的变比含义相同,但是,旋转变压器在不同转角时,磁场耦合程度不同,输出电压不同。因此,旋转变压器的变压比是指在规定励磁条件下,最大空载输出电压的基波分量与励磁电压的基波分量之比。旋转变压器的上述特点,给其变压比测量带来了一定的困难。变压比是旋转变压器的基本技术指标,一般在铭牌中标称。

(4) 开路输入阻抗

开路输入阻抗是旋转变压器的一个重要参数,它反映了旋转变压器在空载(即无负载连接)状态下,输入端口的阻抗特性。开路输入阻抗的大小直接影响了旋转变压器的输入电流和功率损耗。一般而言,旋转变压器的开路输入阻抗在 $200\ \Omega$ 到 $10\ \text{k}\Omega$ 之间,这个范围确保了旋转变压器在正常工作条件下,能够有效地传递电能并减少不必要的功率损耗。

(5) 线性误差

线性误差是指线性旋转变压器在工作角度范围内任意转子位置时的实际输出电压与理论输出电压的偏差。

4. 旋转变压器测量

电路图上旋转变压器共有六根线与电机控制器相连,其中两根为正弦绕组,两根为余弦绕组,两根为励磁绕组。我们将对旋变的三个绕组的阻值和六根线是否有短路进行测量。

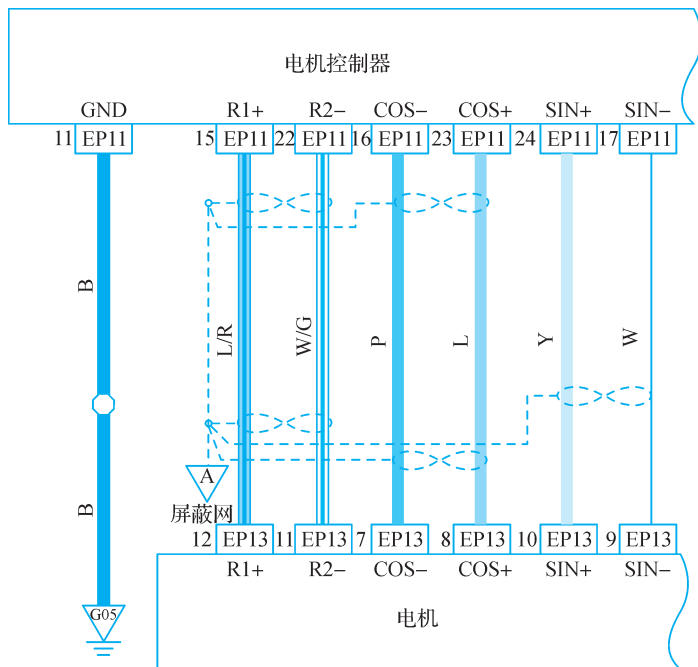


图 1-74 旋转变压器电路图



车辆正常下电后,断开 12 V 电池的负极。确认 CIDD 高压母线电压在人体安全电压范围内。将万用表调至自适应电阻挡位。



图 1-75 万用表自适应电阻挡位

将万用表的两根表笔分别搭在电机插接器的 7 号和 8 号针脚上,万用表的阻值是 $53.9\ \Omega$,而标准阻值为 $55.3\pm 5\ \Omega$ 。



将两支表笔分别搭在7号针脚和8号针脚上

余弦绕组的测量阻值为53.9欧姆

图 1-76 余弦绕组阻值测量

将万用表的两根表笔分别搭在电机插接器的 9 号和 10 号针脚上,万用表的阻值是 $49.3\ \Omega$,而标准阻值为 $49.8\pm 5\ \Omega$ 。



将两支表笔分别搭在9号针脚和10号针脚上

正弦绕组的测量阻值为49.3欧姆

图 1-77 正弦绕组阻值测量

将万用表的两根表笔分别搭在电机插接器的 11 号和 12 号针脚上,万用表的阻值是



20.4 Ω ，而标准阻值为 $20.6 \pm 2 \Omega$ 。

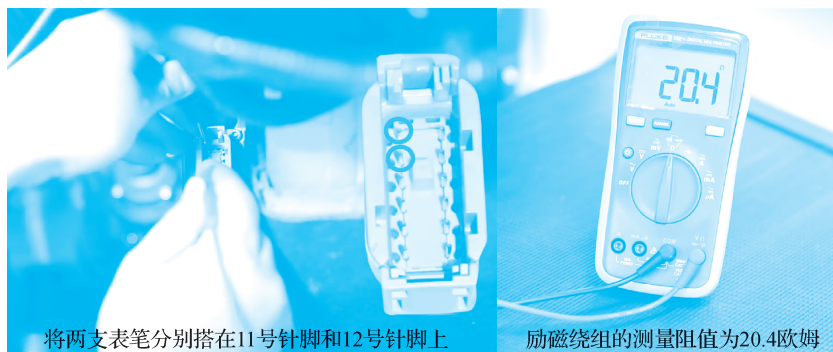


图 1-78 励磁绕组阻值测量

拔下电机控制器低压插头，分别测量 15、16、17、22、23、24 针脚对地电阻，阻值应大于 10 k Ω 。



图 1-79 导线短路测量

5. 未来发展与挑战

旋转变压器行业的技术水平和特点紧密跟随制造业的需求。新能源汽车行业的崛起推动了自动化、智能化以及人机交互技术的持续进步，使得旋转变压器这一性能卓越的位置传感器在新技术、新产业中迅速演变。

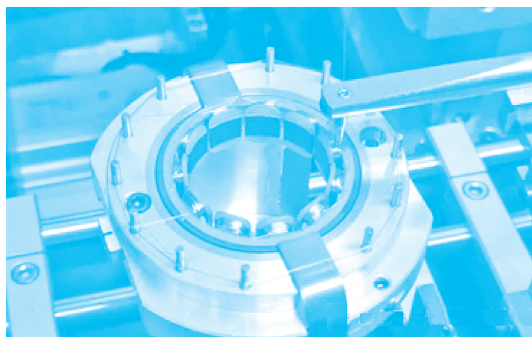


图 1-80 新型旋转变压器



首先,旋转变压器正朝着高转速应用发展。它主要用于驱动电机的位置传感,并随电机同步旋转。高转速意味着更高的功率密度和更低的能耗,因此是驱动电机的一个重要发展方向,也受到国家政策的鼓励。随着驱动电机向高转速发展,配套的旋转变压器也需在高转速下保持稳定性能。同时,高速电机信号的高频输出对解码器的高频响应提出了更高要求。至 2025 年,位置传感器最高工作转速达 20 000 r/min、解码器带宽 >2.5 kHz,至 2030 年位置传感器最高工作转速达 25 000 r/min、解码器带宽 >3.0 kHz,因此,未来位置传感器的最高工作转速和解码器带宽将持续提升。

其次,旋转变压器正向着高精度方向迈进。作为位置传感器,精度是其核心性能。尽管旋转变压器在环境适应性和寿命上具有优势,但在最高精度上与其他传感器相比仍有不足。然而,随着技术的不断进步,研发人员正通过多种方式提升其精度,以拓宽其应用场景。至 2030 年,新一代高精度位置传感器可实现传感器与芯片集成化与深度自学习高精度修正功能,机械角的误差不大于 $\pm 6'$;至 2035 年,机械角的误差不大于 $\pm 5'$ 。

最后,高效且能源节约的电动机是我国政策大力扶持以寻求技术革新的主要领域之一。减轻重量是实现电动机高效能源利用的关键途径之一,而旋转变压器,作为一种特殊的微型电机,也作为驱动电机的关键组件——高精度位置传感器,对于提升驱动系统效率,从而降低电动机的总体能源消耗具有显著作用。伴随着“多合一电机”和“油冷电机”等新一代电驱动系统的涌现,轻量化、集成化已逐渐成为行业未来的发展趋势。旋转变压器正通过重新设计结构和改进工艺等手段进行优化,以满足未来电驱动系统的发展需求。例如,“油冷电机”改变了旋转变压器的工作环境,使其处于浸 ATF 油的环境中,这无疑提高了对旋转变压器的耐油性和绝缘性能的要求。

祝贺您! 您已经完成了“动力电机及控制技术结构原理”课程



扫码可见本项目微课

新能源汽车电机控制技术

项目二

电动汽车是以电动机驱动,从车载电源获得动力,并且满足道路交通安全法规的车辆。根据科技部《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》,电动汽车按动力电气化水平分为两类:一类是全部或大部分工况下主要由电动机提供驱动功率的电动汽车(称为“纯电驱动”电动汽车,例如纯电动汽车、插电式电动汽车、增程式电动汽车以及燃料电池电动汽车);另一类是动力电池容量较小,大部分工况下主要由内燃机提供驱动功率的电动汽车(称为常规混合动力电动汽车)。

车载电源是一个化学蓄电装置,即一个高压蓄电池。该蓄电池仅能存储和输出直流电压。

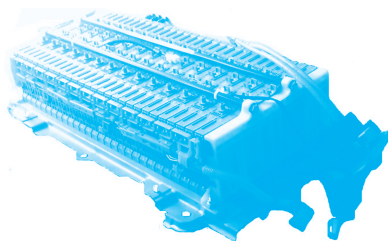


图 2-1 车载电源

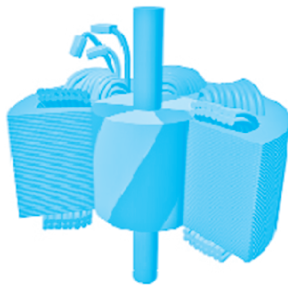


图 2-2 三相电机

电动机在驱动汽车工作过程中,电动机控制器促使电动机工作。电机控制器由逆变器和控制器两部分组成。其中逆变器接收电池输送过来的直流电电能,逆变成三相交流电给汽车电机提供电源;控制器接收电机转速等信号反馈到仪表,当发生制动或者加速行为时,控制器控制变频器频率的升降,从而达到加速或者减速的目的。图 2-3 是众泰云 100S 电动汽车电机控制器原理图。

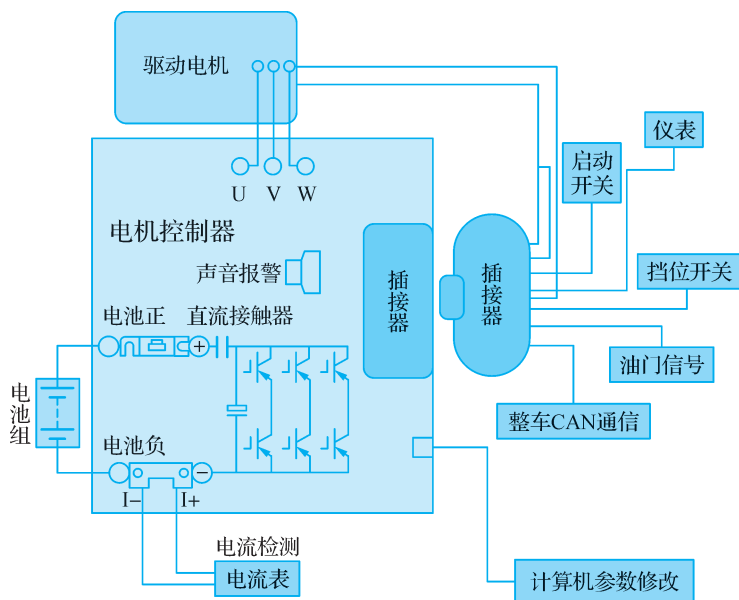


图 2-3 众泰云 100S 电动汽车电机控制器原理图

为了让三相电机运转,需要有三相交流电。本课程描述电动汽车上电机运转的三相交流电压如何是通过直流电压转换而成的。

项目导读

- (1) 新能源汽车中的直流(DC)电源如何转换为交流(AC)电压及电流?
- (2) 新能源汽车动力电机控制模块控制功率晶体管开关的脉冲宽度调制(PWM)有何特点?
- (3) 为何新能源汽车中动力电机需要交流电产生三相旋转场?

知识目标

- (1) 电流与电压之间的关系。
- (2) 脉冲宽度调制(PWM)。
- (3) 脉冲宽度调制(PWM)与电压的关系。
- (4) 脉冲宽度调制(PWM)如何影响电流。
- (5) 上半波的产生。
- (6) 交流电压的产生。
- (7) 旋转电场。



技能目标



- (1) 阅读、理解、评估维修工单。
- (2) 在制造商手册和诊断设备的帮助下,确定电机控制系统故障。
- (3) 制定维修方案,安全规范地进行故障诊断操作。

素质目标



- (1) 与客户沟通交流。
- (2) 具有团队协作能力。
- (3) 养成良好的职业习惯,提高劳动素养。
- (4) 树立安全责任意识。

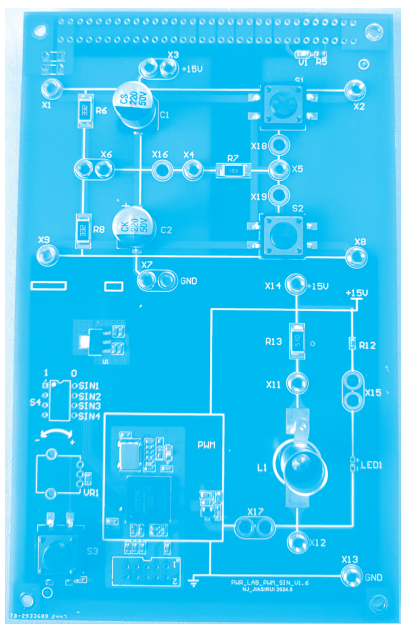
设备



	VDX1901A001	新能源科技综合实验箱
	VDX1901B003	基本直流交流变换实验板卡
	VDX1901B004	三相信号逆变生成板卡
	附件	导线若干



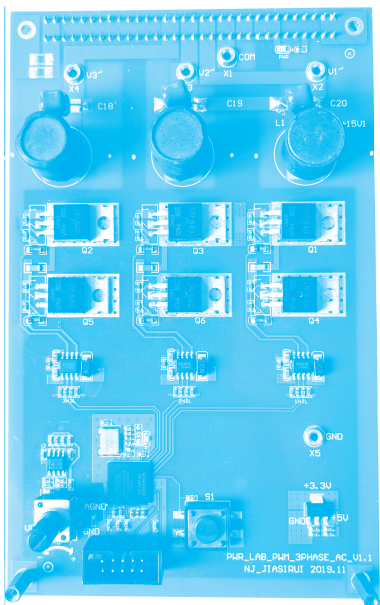
实验卡



名称: VDX1901B003

技术数据:

- 工作电压: 直流+15 V
- DC/AC(直流交流)变换器
- 开关 S1、S2
- 测量电阻 R7
- 带有 LED 显示的 PWM 发生器
- 用于控制 PWM 发生器的电位器 VR1
- 带有指示灯 L1 的电路
- 尺寸: 160 mm×100 mm(宽×高)



名称: VDX1901B004

技术数据:

- 工作电压: 直流±15 V
- 三相交流信号
- DC/AC 转换器
- 尺寸: 160 mm×100 mm(宽×高)

⚠警告: 本实验卡不得连接外部电源。

将实验卡插入实验箱左边或者右边卡槽中, 打开实验箱左下方开关(红色指示灯亮), 实验卡即上电运行。



任务1 基础知识

电机的工作原理是基于物理原理:电磁感应定律和洛伦兹力。

1. 电磁感应

问:电与磁有什么关系?

答:奥斯特发现电流的磁效应,即电流能产生磁场。法拉第发现电磁感应现象:穿过闭合电路的磁通量发生变化时,能产生感应电流,即电能生磁,磁也能生电。

1831年,一位叫迈克尔·法拉第的科学家发现了磁与电之间的相互联系和转化关系。只要穿过闭合电路的磁通量发生变化,闭合电路中就会产生感应电流。这种利用磁场产生电流的现象称为电磁感应(Electromagnetic induction),产生的电流叫作感应电流。

当一个导体在力 F 的作用下穿过一个磁场时,该导体内便会感应出电压 U 。

如果该导体被连接在一个闭合电路中,该感应电压 U 便会引起电流 I 。

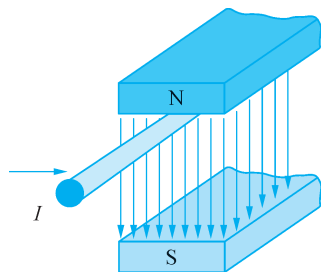


图2-4 导体在磁场中切割磁力线运动

注释 电磁感应原理说明,无论直流电机或三相电机,在电机中均会生成电压和电流。

2. 洛伦兹力

问:磁场如何产生力?

答:为了理解电机的工作方式,不仅有必要理解感应定则,还需要理解磁场如何在带电流的导线中产生力——洛伦兹力。

➤ 当一个外部磁场以垂直于电流方向作用于一个载流导体时,会产生一个垂直于该电流和该磁场的力。

➤ 该力与流经该导线的电流 I 以及该外部磁场的强度成正比。

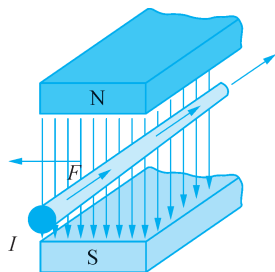


图2-5 带电导体在磁场运动

注释 当一个磁场力作用于一个载流导体时,这种力的作用会使得该导体移开其静止位置。

由此得出推论,一个位置固定的载流导体同样也会使一个可移动的磁场移开其静止位置。

注释 洛伦兹力说明,当受到一个磁场的作用时,一个载流导体会移动。这便是电动机工作的基础原理。



3. “左手定则”和“右手定则”

可以用一种简单的方法判出洛伦兹力的方向,即所谓“左手定则”。

设以下各矢量均彼此垂直:

I = 电子流速(与传统电流方向相反)

B = 由外部磁场引起的磁感应

F = 力(洛伦兹力)

那么,只要其中两个矢量已知,便能用“左手定则”求出第三个矢量的方向。

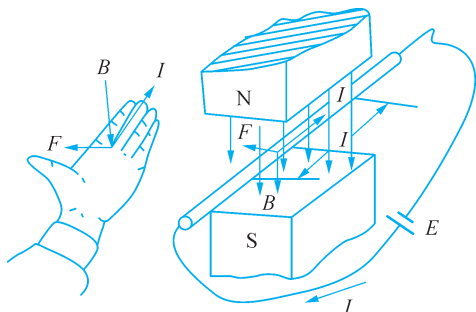


图 2-6 左手定则

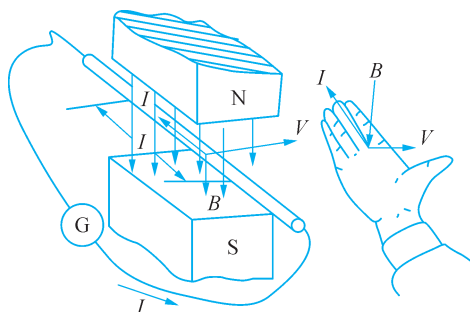


图 2-7 右手定则

可以用一种简单的方法判出感应电流(感生电动势)的方向,即所谓“右手定则”。

设以下各矢量均彼此垂直:

I = 感应电子流速(与传统电流方向相反)

B = 由外部磁场引起的磁感应

V = 运动方向

那么,只要其中两个矢量已知,便能用“右手定则”求出第三个矢量的方向。

自我评估



- 电动机运行的基本物理原理有哪些? ()
A. 电磁感应 B. 涡流 C. 洛伦兹力 D. 力之和
- 在以下何种条件下感应电压 U 会在导线中生成电流 I ? ()
A. 当在开路电路中时 B. 当在闭路电路中时 C. 当盘绕着一个铁芯时
- 指出一种求出洛伦兹力方向的简单方法。()
A. 图解定则 B. 左手定则 C. 右手定则
- 磁场如何出现在一个导体内? ()
A. 由于频率 B. 由于电压 C. 由于电流
- 指出一种求感应电动势方向的简单方法。()
A. 图解定则 B. 左手定则 C. 右手定则



任务2 电流与电压

观看视频:描述灯泡亮度变化的原因?

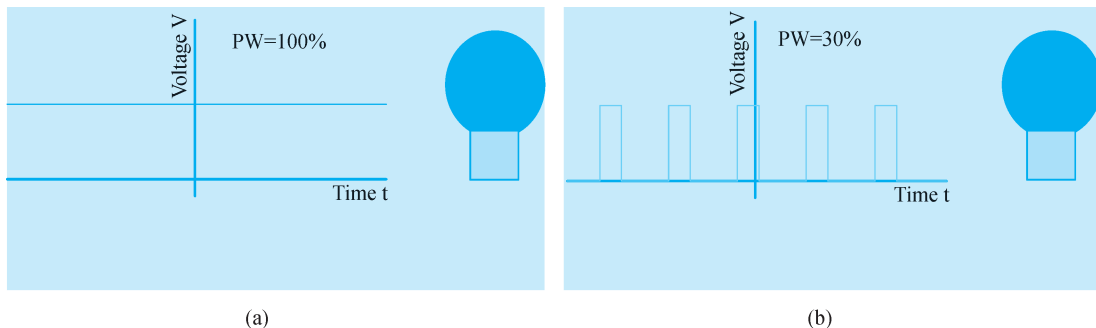


图 2-8 灯的脉冲宽度调制控制

灯泡亮度变化的原因:_____。

1. 欧姆定律

为简明起见,本节内容将参照带有一个电阻(欧姆)负载的直流电路。

电流与电压之间的关系由欧姆定律决定,该定律以德国物理学家格奥尔格·欧姆(Georg Ohm)的名字命名。首先考虑图 2-9 所示简单电路。

设想电阻 R 为电动机定子绕组的电阻。这样我们得到可用于电动机的关系。

例如,如果该电路的电压加倍,那么其电流也将加倍。

电流 I 随着电压 U 的升高而增大。

电流变化率与电压变化率相等。

欧姆定律由以下公式表示:

$$I = \frac{U}{R}$$

公式中物理量的单位: I :电流,单位是安培(A)。 U :电压,单位是伏特(V)。 R :电阻,单位是欧姆(Ω)。

这可以描绘成图 2-10 所示:

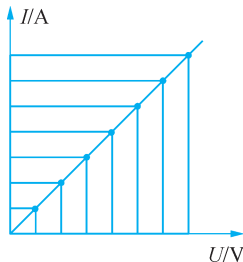


图 2-10 伏安特性曲线

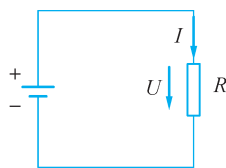


图 2-9 电路原理



技能训练一 电压与电流之间关系



目的

观察电压变化如何影响电流。



实施步骤

步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

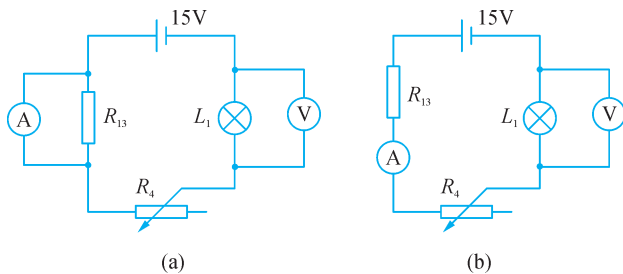


图 2-11 欧姆定律电路图

用导线连接各端子。

测量导线	连接至...
表 1(电压挡)红色	X11(灯泡)
表 1(电压挡)黑色	X12(灯泡)
表 2(电流挡)红色	电位器 R_4 的 0
表 2(电流挡)黑色	X13

导线从...	连接至...
连接插头(跳线)X12	电位器 R_4 的 1



顺时针旋转旋钮: 1~0由0~22kΩ
2~0由22kΩ~0

图 2-12 电位器 R_4 接线图



使用万用表电压挡来检测电压,把万用表红表笔插入“VΩHz”,黑表笔插入“COM”,按图 2-13 连接线路。



图 2-13 万用表电压挡接线图

使用万用表电流挡来检测电流,选择“mA”挡,把万用表红表笔插入“ $\mu\text{A mA } ^\circ\text{C } ^\circ\text{F}$ ”,黑表笔插入“COM”,按图 2-14 连接线路。



图 2-14 万用表电流挡接线图

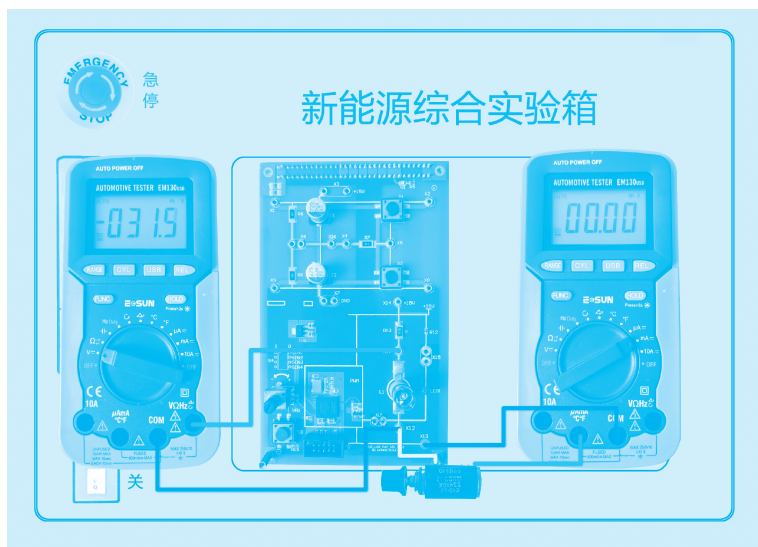


图 2-15 电压与电流关系连接图



步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开万用表,调整旋钮到“V”位置,按“FUNC”选择直流“DC”。

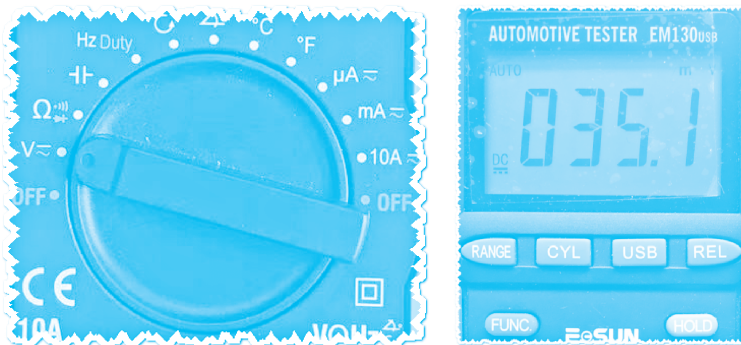


图 2-16 万用表“电压”功能选用

3. 打开万用表,调整旋钮到“mA”位置,按“FUNC”选择直流“DC”。

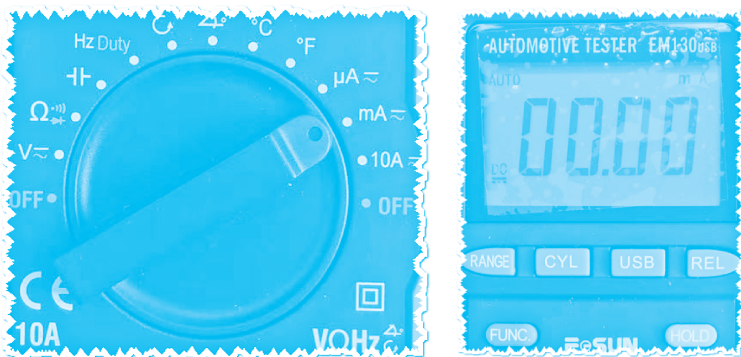
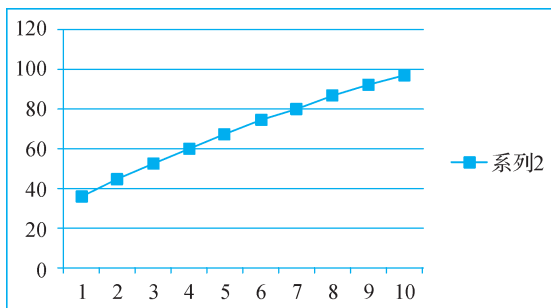
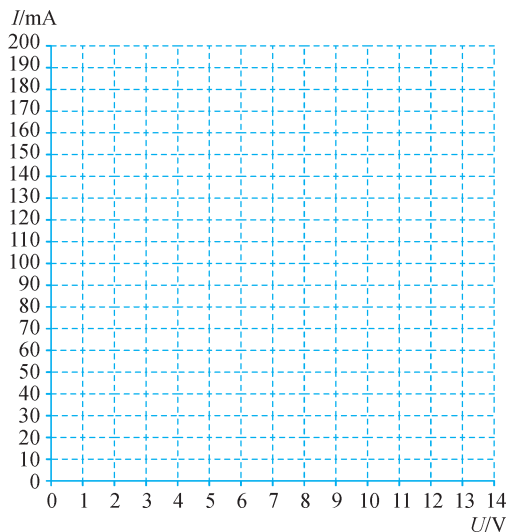


图 2-17 万用表“电流”功能选用

4. 调节电位器 VR1 使之位于其最小值位置(左旋到底,灯泡不亮状态)。
5. 确保电位器(滑动变阻器) R_4 提供的值在最大值和最小值之间。
6. 顺时针旋转滑动变阻器旋钮,电压值由大变小,灯泡亮度由亮变暗。
7. 注意设备上的读数。
8. 记录数值于表格并画出对应曲线图(可以用 EXCEL)。



$U(V)$	$I(mA)$
1	36
2	44.7
3	52.5
4	60.2
5	67.3
6	74.3
7	80.0
8	86.5
9	92.1
10	96.9



注释 由于测量数据是在灯珠处于“热”状态时测得,该电路或多或少会表现得与纯电阻负载电路一样。

自我评估



- 如果一个闭合电路中的电压升高,那么电流会怎样? ()
A. 电流增大 B. 电流减小 C. 无变化
- 带电阻负载的电路中电压升高时,电流会有何响应? ()
A. 无变化 B. 与电压成正比增大 C. 减小
- 由欧姆定律描述其相互依存关系的物理性质有哪些? ()
A. 电流 B. 力 C. 位移 D. 电压
E. 长度 F. 电阻 G. 电容 H. 磁性
- 什么因素会导致带有一个纯电阻(欧姆)负载的电路中的电流加倍? ()
A. 电压减半 B. 电压加倍 C. 电压升高成三倍



5. 当电流加倍时,带有一个纯电阻(欧姆)负载的电路中的阻抗会怎样? ()

A. 无变化 B. 会加倍 C. 会减半

2. 电流与电压关系在车辆上的应用——控制电负载的功率

举例说明,在基于汽车计算平台下现代汽车应用中,哪些设备在工作过程中的负载供电需要变化?(学生回忆)例如:

- 车灯亮度变化,例如仪表盘照明或制动/车尾灯、前照灯等;
- 电机速度控制,例如风扇或挡风玻璃雨刮电机、新能源纯电动汽车动力;
- 阀门开启,例如怠速控制或排气再循环阀、喷油器等;
- 汽车收音机音量控制。

(提问学生)通过哪些方法可以改变负载供电?

- 通过变换电压来改变负载两端的工作电压;
- 通过串联电阻器来降低负载两端的电压;
- 电压快速脉冲(打开或关闭电路,即以一定频率开关)。

(引申出问题)电压的快速脉冲,即将其打开和关闭,是本课程的重要内容。

通过脉冲发生器快速切换电源电压被称为脉冲宽度调制,缩写为 PWM。

任务3 脉冲宽度调制(PWM)

脉冲宽度调制是一种模拟控制方式,根据相应载荷的变化来调制晶体管基极或 MOS 管栅极的偏置,来实现晶体管或 MOS 管导通时间的改变,从而实现开关稳压电源输出的改变。这种方式能使电源的输出电压在工作条件变化时保持恒定,是利用微处理器的数字信号对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术。广泛应用在从测量、通信到功率控制与变换的许多领域中。

脉宽调制(PWM)基本原理:控制方式就是对逆变电路开关器件的通断进行控制,使输出端得到一系列幅值相等但宽度不一致的脉冲,用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形。也就是在输出波形的半个周期中产生多个脉冲,使各脉冲的等值电压为正弦波形,所获得的输出平滑且低次谐波少。按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制,既可改变逆变电路输出电压的大小,也可改变输出频率。

在 PWM 波形中,各脉冲的幅值是相等的,要改变等效输出正弦波的幅值时,只要按同一比例系数改变各脉冲的宽度即可,因此,在交-直-交变频器中,PWM 逆变电路输出的脉冲电压就是直流侧电压的幅值。

如果通过脉冲宽度调制(PWM)控制电压 U_1 ,通过欧姆定律可知电流 I_1 将形成,如图 2-18(a)所示。

一个“宽”脉冲包含更高电压 U_2 ,并因而导致更高电流 I_2 ,如图 2-18(b)所示。

脉冲宽度变化导致所得电压 U_3 的改变,因而 I_3 也会改变,如图 2-18(c)所示。

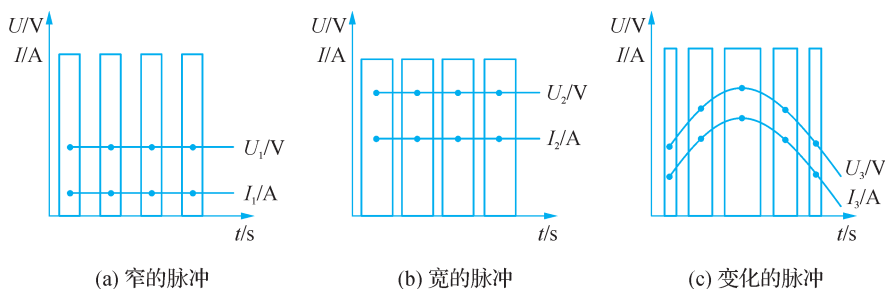


图 2-18 脉宽调制(PWM)基本原理

注释 服从欧姆定律(电流与电压成正比)的电阻器可以称作欧姆电阻器。金属导体一般都是欧姆电阻器。如果此类金属导体盘绕成线圈,类似于电机内部的情况,会引起一些扰动变量,因此,在该情况下欧姆定律只能作为近似计算。

技能训练二 认识脉冲宽度调制(PWM)发生器信号形式



通过示波器,观察 PWM 发生器的信号形式。



步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

测量导线	连接至...
CH1 红色	X11
CH1 黑色	X12 或 X13

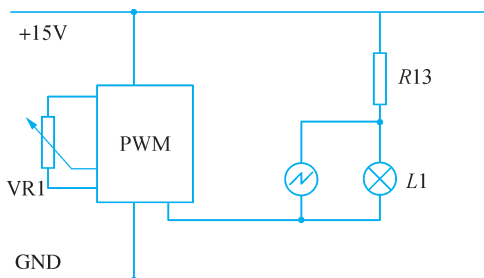


图 2-19 PWM 电路信号测试原理图

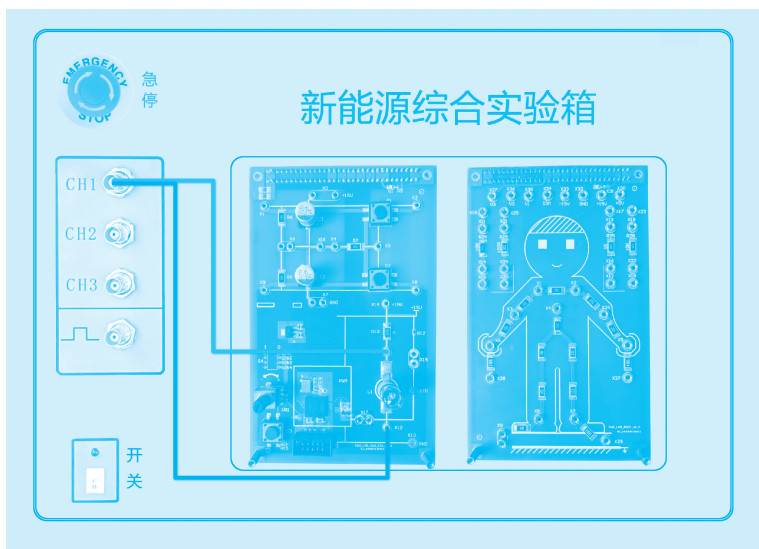


图 2-20 PWM 电路信号测试黑线连接 X12(0—10 V 之间)

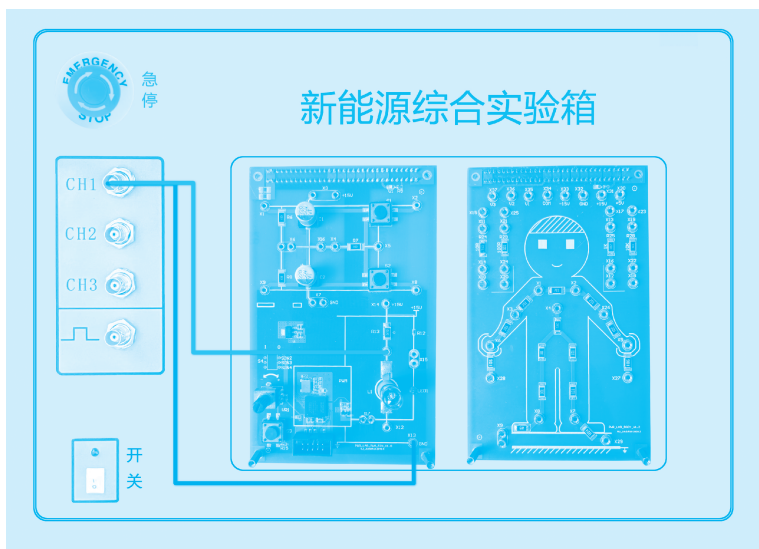


图 2-21 PWM 电路信号测试黑线连接 X13(15—10 V 之间)

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:
TIME/DIV(50 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)



图 2-22 PWM 电路信号测试虚拟示波器设置

3. 调节电位器 VR1 使之位于其最小值和最大值之间(电位器 VR1 旋钮逆时针旋到底, 灯泡不亮状态)。
4. 将电位器设定在中间部位(观察示波器波形脉宽均匀变化)。
5. 观察灯泡 L1 亮度变化。
6. 注意设备上的读数。

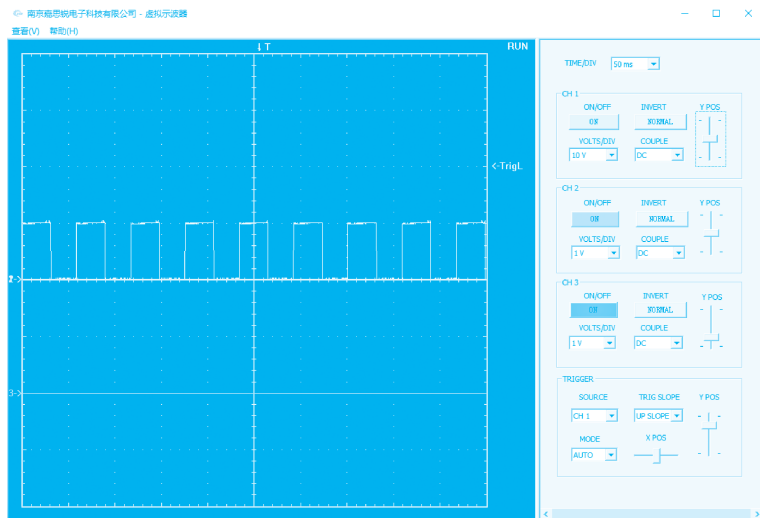


图 2-23 PWM 电路信号测试黑线连接 X12(0—10 V 之间)

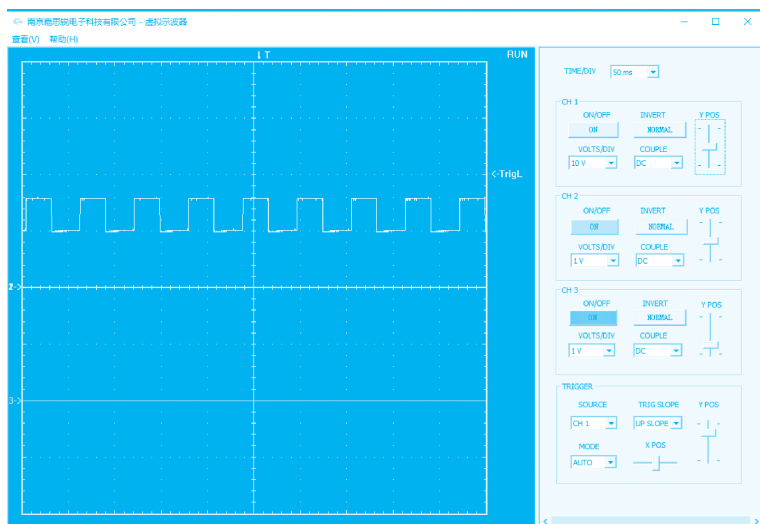


图 2-24 PWM 电路信号测试黑线连接 X13(15—10 V 之间)

自我评估



- PWM 发生器输出何种电压? ()
A. AC
B. DC
- 该电压信号看起来是什么样? ()
A. 具有高振幅的 AC 电压
B. 平滑的 DC 电压
C. 该电压信号被分成许多脉冲
- 负极连接 X12(0—10 V 之间), 脉冲宽度越宽, 灯泡变化是()。
A. 不变
B. 变亮
C. 变暗
- 负极连接 X13(10—15 V 之间), 脉冲宽度越宽, 灯泡变化是()。
A. 不变
B. 变亮
C. 变暗

注意:黑线连接 X12, 电位器 VR1 旋钮顺时针旋转, 灯泡两端的电压是 0~10 V 之间变化, 电压越大, 灯泡越亮; 黑线连接 X13, 电位器 VR1 旋钮顺时针旋转, 灯泡上侧(X11)和 X13(地)之间的电压是在 15~10 V 之间变化, 灯泡下侧(X12)和 X13(地)之间的电压是在 15~0 V 之间变化, 即 X12 和 X13(地)之间电压越小, 灯越亮。



技能训练三 脉冲宽度调制(PWM)与电压关系

目的



研究脉冲宽度调制(PWM)如何影响电压。

实施步骤



步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

测量导线	连接至…
CH1 红	X11
CH1 黑	X12 或 X13

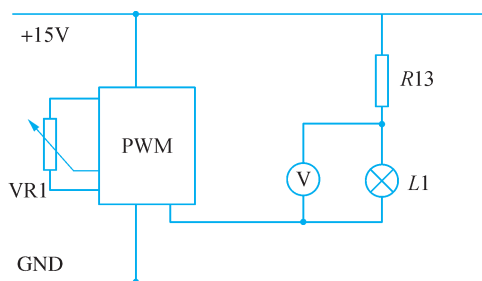


图 2-25 电压表测试 PWM 电路信号原理图

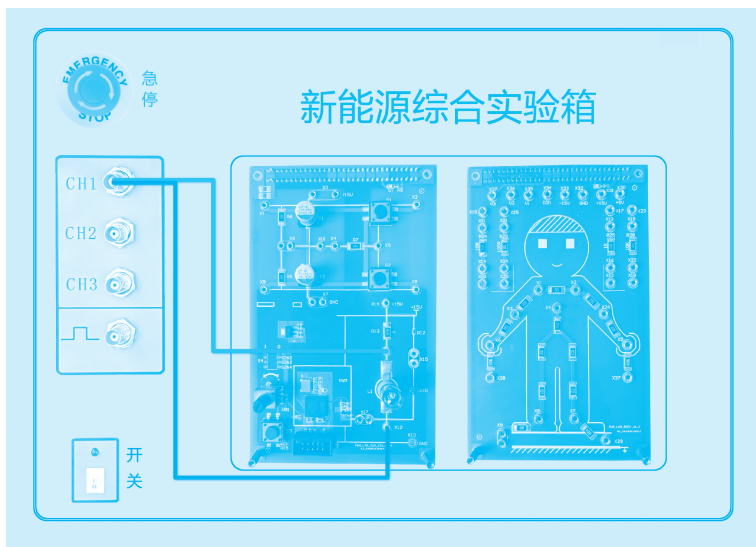


图 2-26 电压表黑线连接 X12(0—10 V 之间)

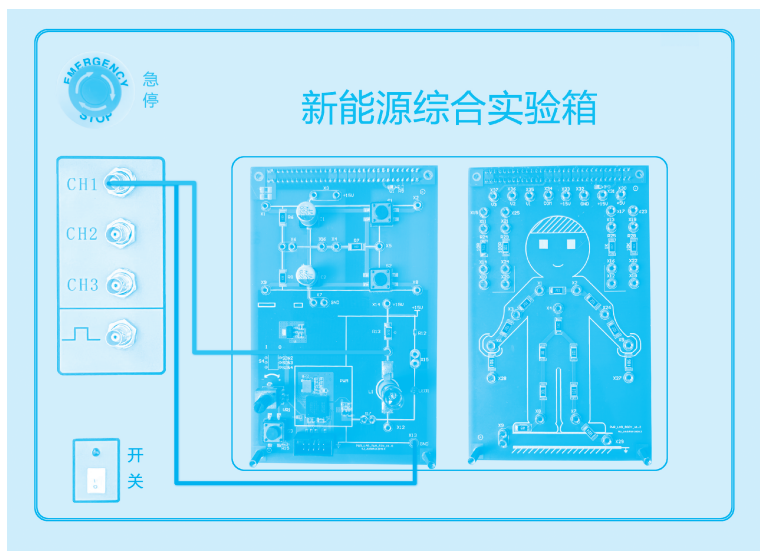


图 2-27 电压表黑线连接 X13(10—15 V 之间)

或者使用万用表检测电压；用导线连接各端子。

测量导线	连接至…
表 1 红色	X11(灯泡)
表 1 黑色	X12 或 X13

使用万用表电压挡来检测电压，把万用表红表笔插入“VΩHz”，黑表笔插入“COM”，按图 2-28 连接线路。



图 2-28 万用表电压挡接线图

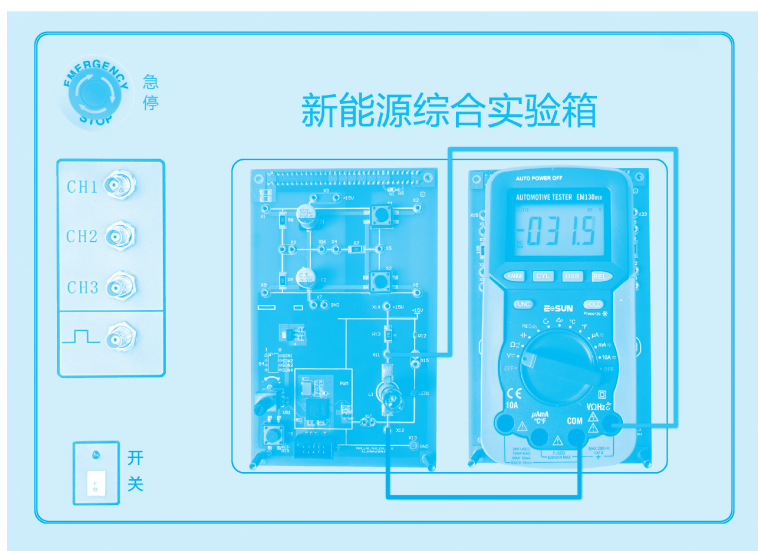


图 2-29 万用表电压挡负极连接 X12(0—10 V 之间)

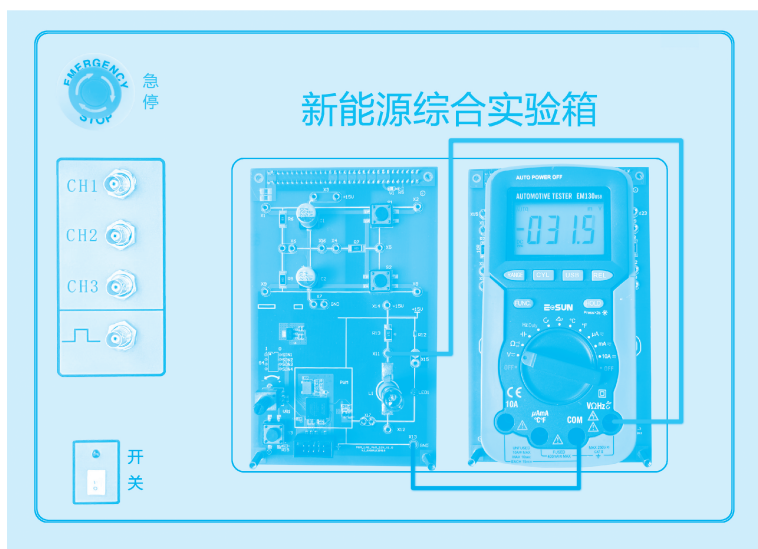


图 2-30 万用表电压挡负极连接 X13(15—10 V 之间)

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:
TIME/DIV(10 ms), ON/OFF(ON), VOLTS/DIV(10V), COUPLE(DCT)

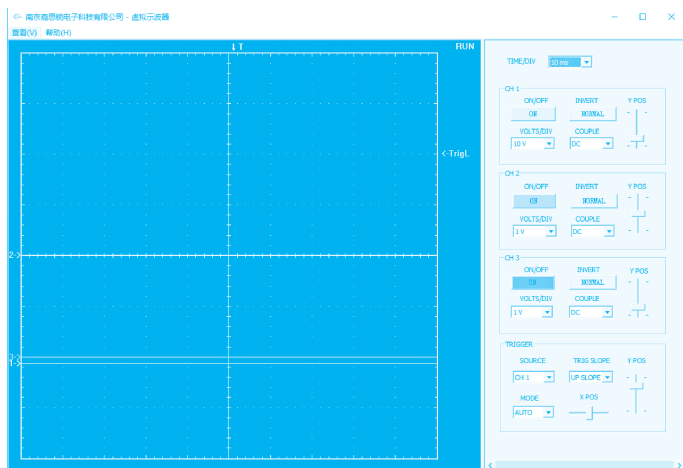


图 2-31 示波器设置

3. 在虚拟示波器“功能”菜单中单击“电压表”打开电压表 1,电压表 1 必须设置为测量直流电压,量程选 100 V。用电压表 1 测量通过灯泡 L1 的电压。

4. 进行如下设置:

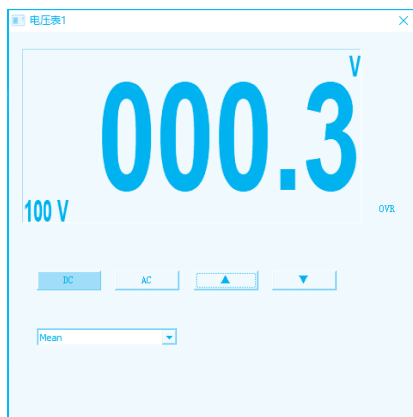


图 2-32 电压表设置

如果使用万用表检测,按 5 步操作。

5. 打开万用表,调整旋钮到“V $\approx$ ”位置,按“FUNC”选择直流“DC”。

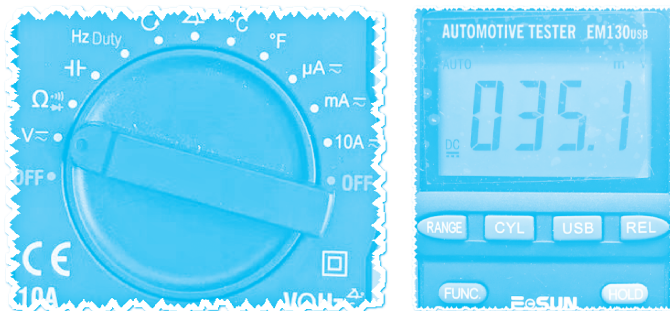


图 2-33 万用表设置

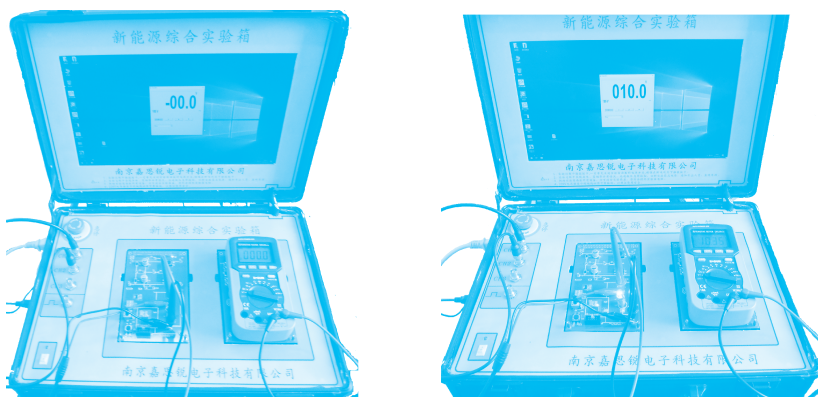


6. 调节电位器 VR1 使之位于其最小值和最大值之间(电位器 VR1 旋钮逆时针旋到底, 灯泡不亮状态)。
7. 顺时针缓慢旋转电位器 VR1 旋钮, 使之从最小值变化到最大值。
8. 观察 LED 和灯泡 L1 亮度。
9. 观察设备上电压变化。



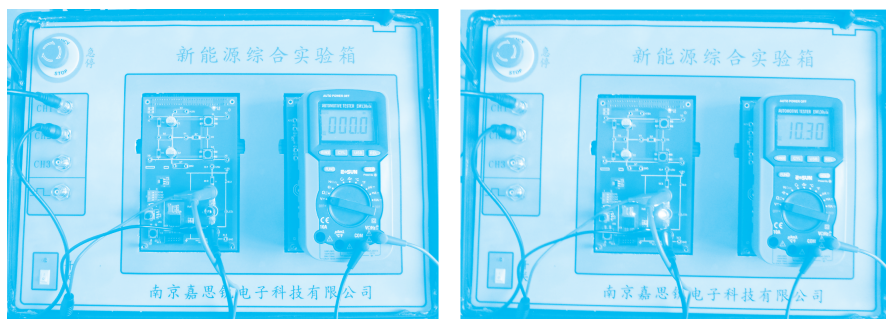
图 2-34 电压表读数

(1) 黑线连接 X12 电压变化范围: $0 \sim 10$ V。



(a) 电位器 VR1 最小位置

(b) 电位器 VR1 最大位置

图 2-35 电压表黑线连接 X12 电压变化范围: $0 \sim 10$ V

(a) 电位器 VR1 最小位置

(b) 电位器 VR1 最大位置

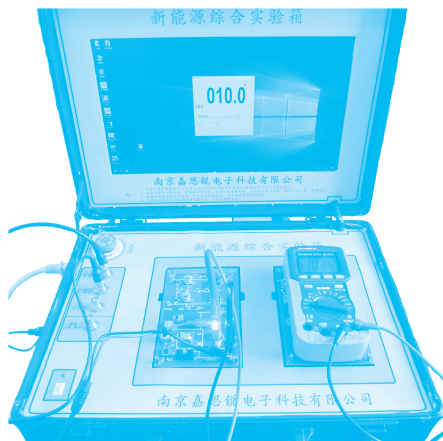
图 2-36 万用表黑线连接 X12 电压变化范围: $0 \sim 10$ V



(2) 黑线连接 X13 电压变化范围:15~10 V。

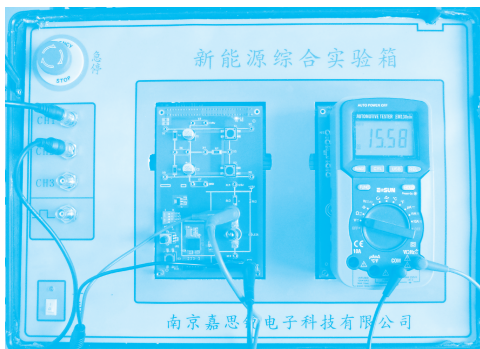


(a) 电位器VR1最小位置

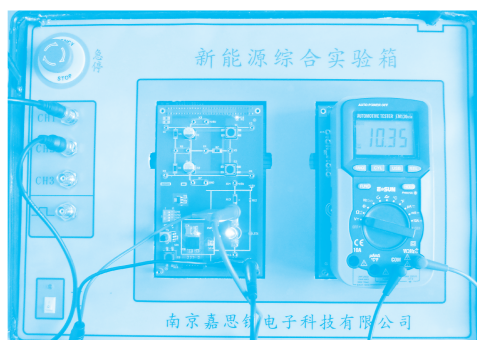


(b) 电位器VR1最大位置

图 2-37 电压表黑线连接 X13 电压变化范围:15~10 V



(a) 电位器VR1最小位置



(b) 电位器VR1最大位置

图 2-38 万用表黑线连接 X13 电压变化范围:15~10 V

自我评估



1. 电位器设置对于 LED 灯 L1 的亮度有何影响? ()
 - A. 亮度无变化
 - B. LED 灯 L1 开始熄灭
 - C. LED 灯 L1 始终保持最大光强度
 - D. LED 灯的亮度根据电位器设置而变化
2. 改变电位器设置对于所显示的电压有何影响? ()
 - A. 电压保持相同的低值
 - B. 电压随着电位器设置一起变化
 - C. 电压保持相同的高值



技能训练四 脉冲宽度调制(PWM)与电流关系



目的

研究脉冲宽度调制(PWM)如何影响电流。



实施步骤

步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

测量导线	连接至…
CH1 红	小人的 X11 或 X15
CH1 黑	小人的 X10 或 X14
万用表(电压挡)红	X11
万用表(电压挡)黑	X12

导线从…	连接至…
小人的 X11 或 X15	X12
小人的 X10 或 X14	X17

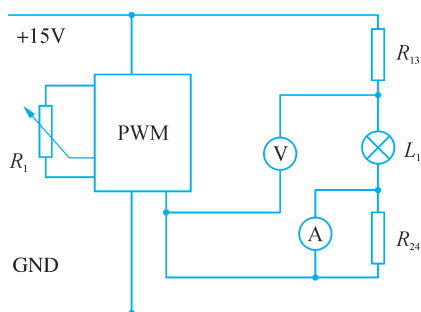


图 2-39 电流表测试 PWM 电路信号原理图

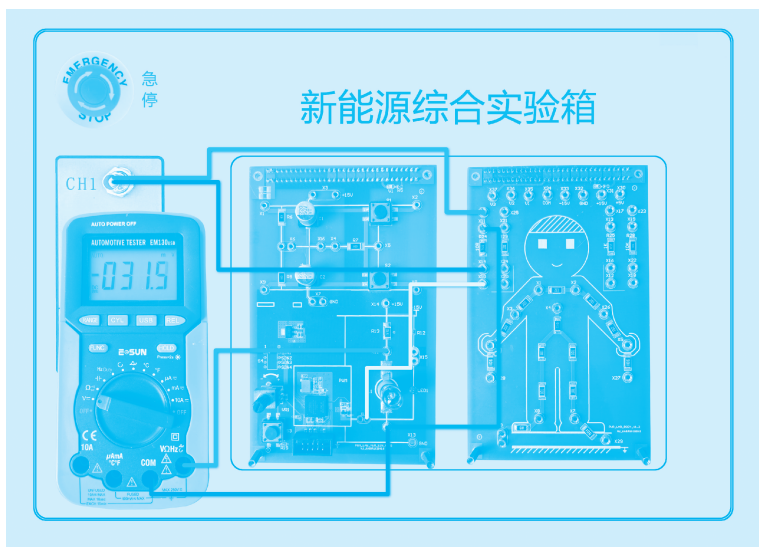


图 2-40 电流表测试 PWM 电路信号接线图

或者使用万用表检测电流:用导线连接各端子。

测量导线	连接至…
表 1(电压挡)红色	X11(灯泡)
表 1(电压挡)黑色	X12
表 2(电流挡)红色	X17(一端子)
表 2(电流挡)黑色	X17(另一端子)

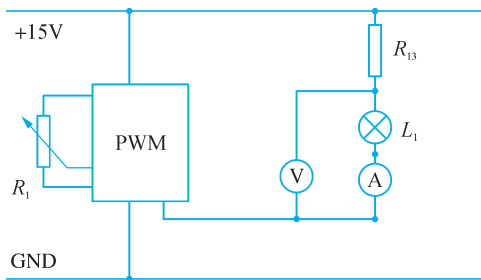


图 2-41 万用表电流挡测试 PWM 电路信号原理图

使用万用表电压挡来检测电压,把万用表红表笔插入“VΩHz”,黑表笔插入“COM”,按图 2-42 连接线路。

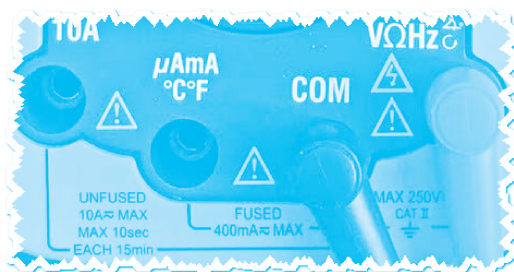


图 2-42 万用表电压挡接线图

使用万用表电流挡来检测电流,选择“mA”挡,把万用表红表笔插入“ $\mu\text{A mA } ^\circ\text{C } ^\circ\text{F}$ ”,黑表笔插入“COM”,按图 2-43 连接线路。



图 2-43 万用表电流挡接线图

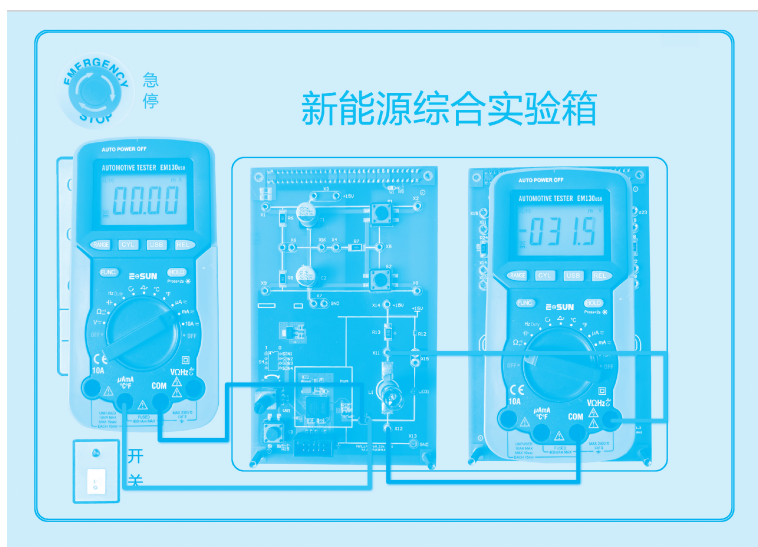


图 2-44 万用表电流挡测试 PWM 电路信号接线图

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:



TIME/DIV(10 ms), ON/OFF(ON), VOLTS/DIV(10V), COUPLE(DCT)

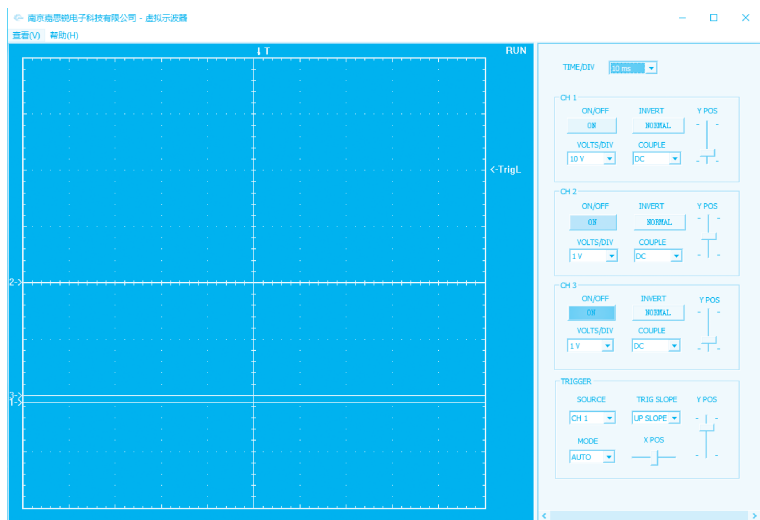


图 2-45 虚拟示波器设置

3. 在虚拟示波器“功能”菜单中单击“电流表”打开电流表 1, 电流表 1 必须设置为测量直流电流, 电阻值应设置为 $10\ \Omega$, 将测量范围设置为 1 A。

注意: 电流必须通过分路电阻间接测量, 本课程分路电阻是 $10\ \Omega$ 。

4. 进行如下设置:



图 2-46 电流表设置

5. 打开万用表, 调整旋钮到“V_~”位置, 按“FUNC”选择直流“DC”。

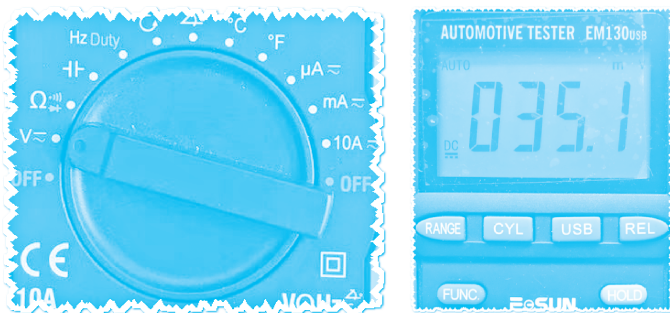


图 2-47 万用表电压挡设置

如果使用万用表检测,重复第 5 步,按第 6 步操作。

6. 打开万用表,调整旋钮到“mA”位置,按“FUNC”选择直流“DC”。

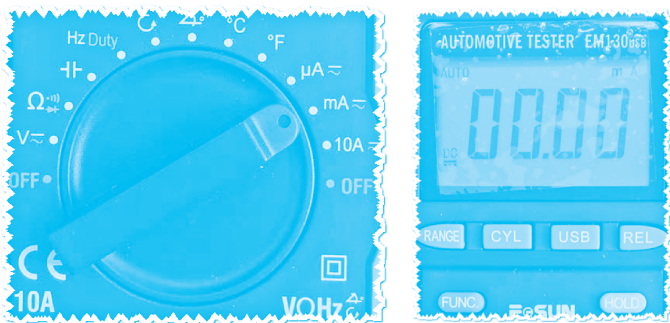


图 2-48 万用表电流挡设置

7. 调节电位器 VR1 使之位于其最小值和最大值之间(电位器 VR1 旋钮逆时针旋到底,灯泡不亮状态)。

8. 顺时针缓慢旋转调节电位器 VR1 旋钮,使之位于从最小值变化到最大值,并注意电压表读数为整数时,记录电流表读数。

9. 观察 LED 和灯泡 L1 亮度变化。

10. 注意设备上的读数。

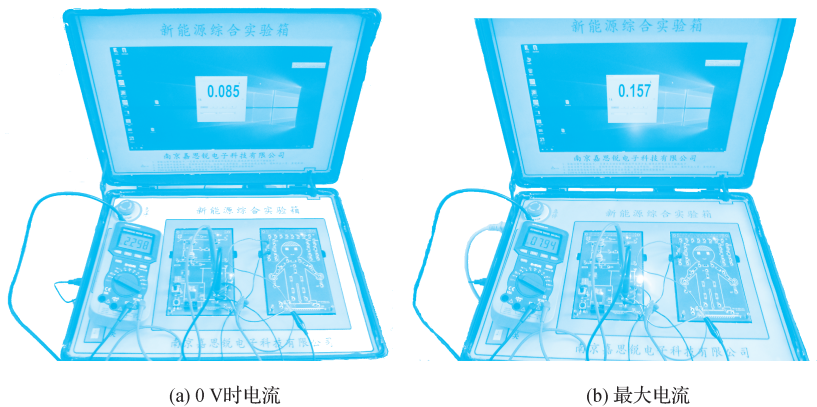
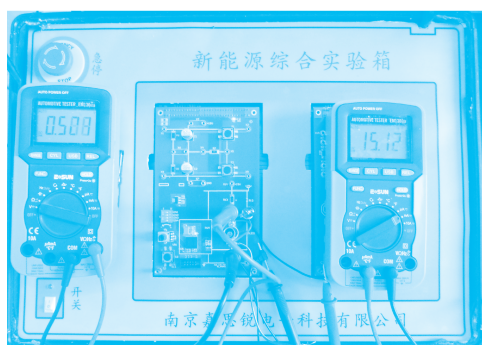
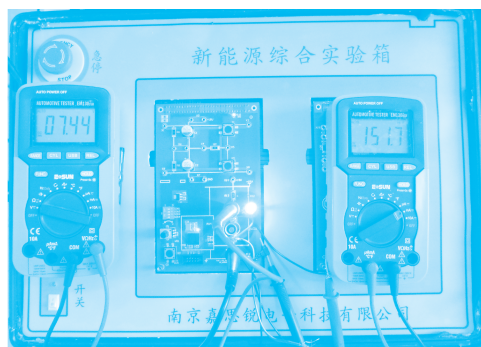


图 2-49 电流表测试



(a) 0.5 V时电流



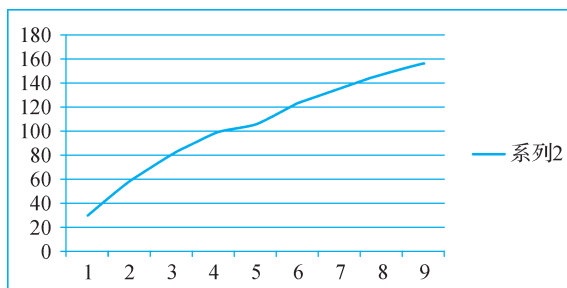
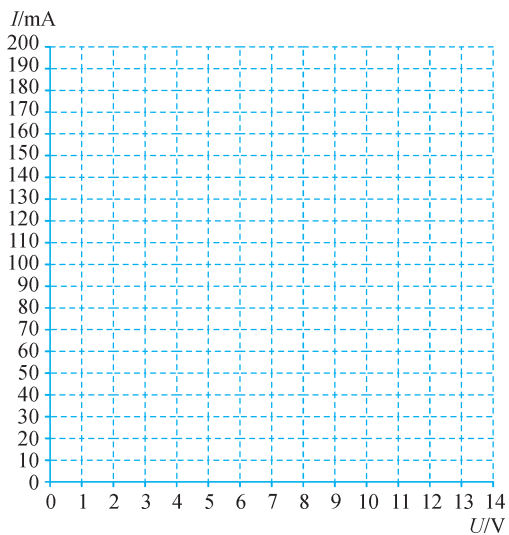
(b) 最大电流

图 2-50 万用表测试

11. 记录数值于表格并画出对应曲线图(可以用 EXCEL 画图)。

(1) 虚拟示波器电流表数据

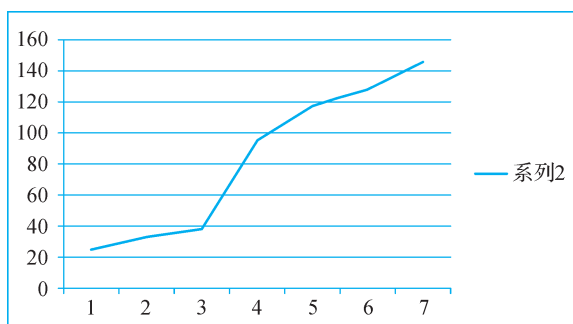
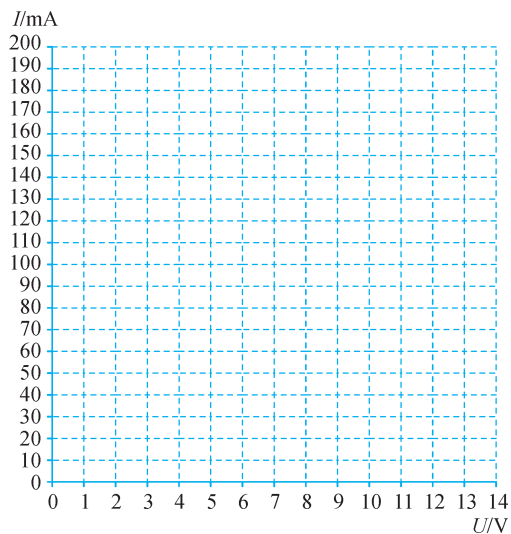
$U(V)$	$I(mA)$
0	30
1	58
2	80
3	98
4	105
5	123
6	135
7	147
7.86	156





(2) 万用表电流表数据

$U(V)$	$I(mA)$
0.5	15
1	25
2	33
3	38
4	95
5	117
6	128
7	145
7.5	152



注释 由于测量数据是在灯珠处于“热”状态时测得,该电路或多或少会表现得与纯电阻负载电路一样。

自我评估



1. 您可以从该表中得出什么结论? ()
 - A. 电压与电流双双或多或少地呈线性增大。
 - B. 随着电压的增高,电流变小。
 - C. 随着电压的增高,电流不变。



任务 4 正半波

技能训练五 脉冲宽度调制(PWM)与正半波



使用 PWM 发生器只能生成一个正半波,并使用示波器对其作记录。



步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

测量导线	连接至...
CH1 红	X11
CH1 黑	X12 或 X13

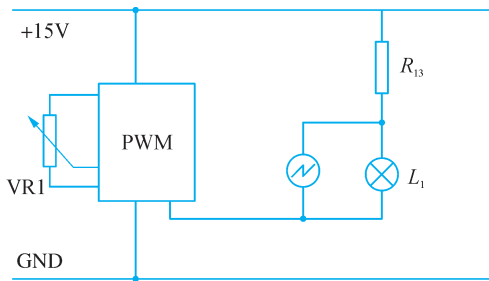


图 2-51 PWM 电路信号测试原理图

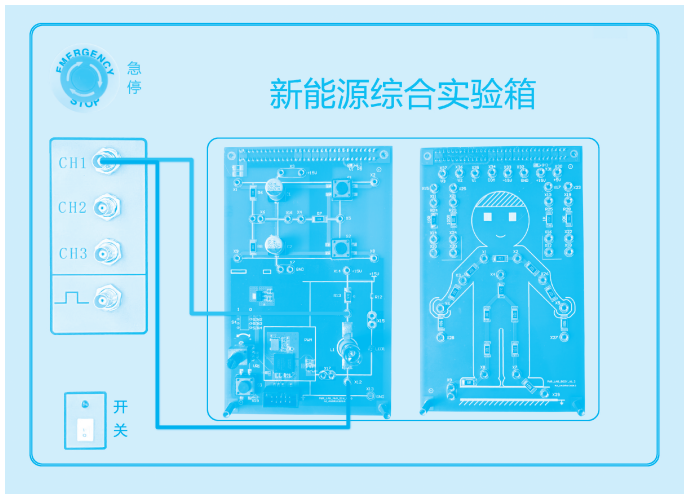


图 2-52 PWM 电路信号测试黑线连接 X12(0—10 V 之间)

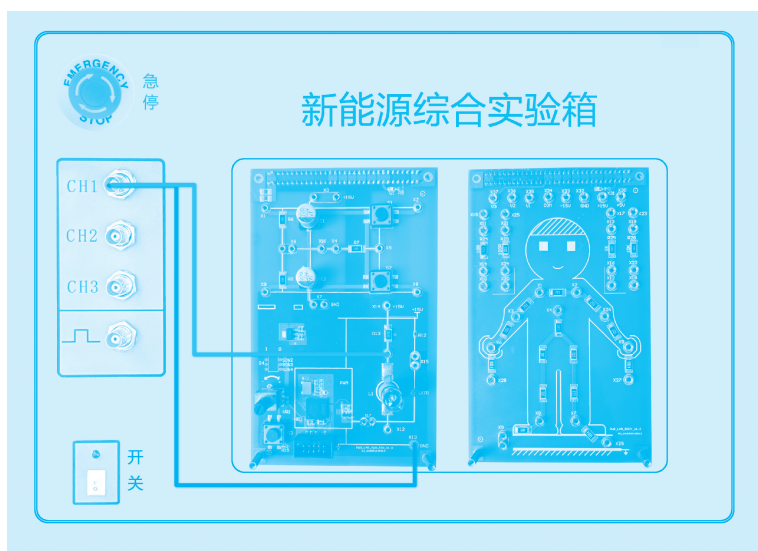


图 2-53 PWM 电路信号测试黑线连接 X13(15—10 V 之间)

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:
TIME/DIV(500 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10V),COUPLE(DCT)

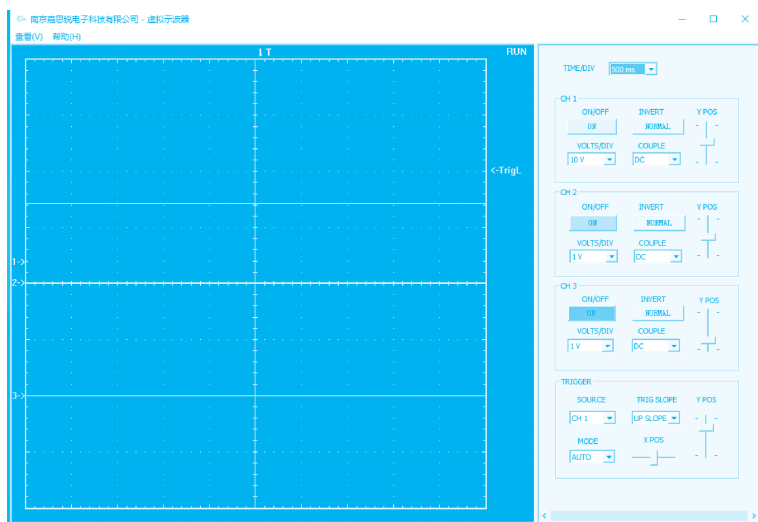


图 2-54 PWM 电路信号测试虚拟示波器 500 ms 设置

TIME/DIV(200 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

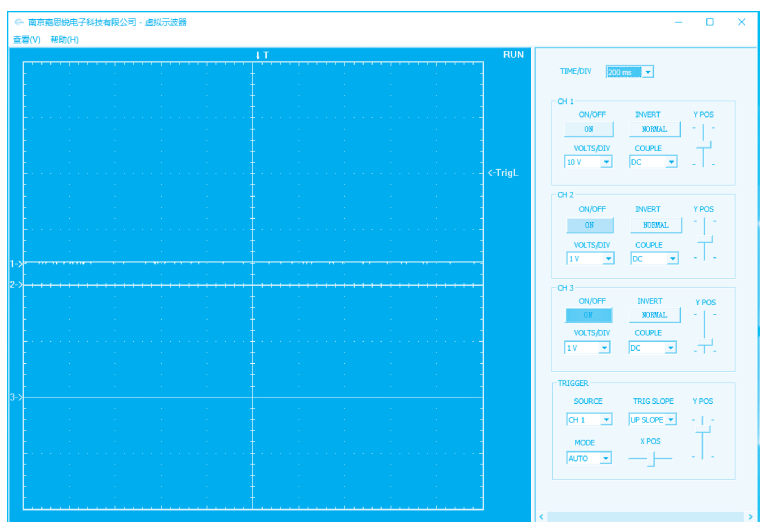


图 2-55 PWM 电路信号测试虚拟示波器 200 ms 设置

TIME/DIV(100 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

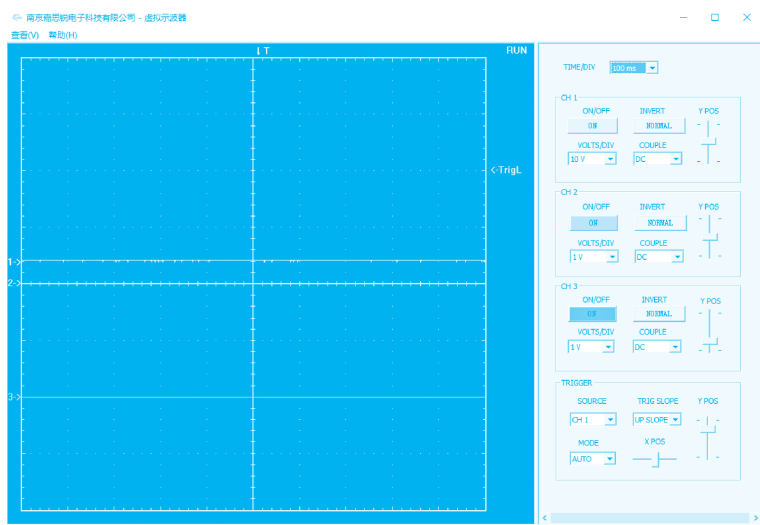


图 2-56 PWM 电路信号测试虚拟示波器 100 ms 设置

3. 调节电位器 VR1 使之位于其最小值和最大值之间(电位器 VR1 旋钮逆时针旋到底,灯泡不亮状态)。
 4. 从灯泡 L1 熄灭状态开始,快速旋转电位器 VR1 的旋钮,使其在最小值和最大值之间变化。
 5. 捕捉到一条好看的波形时,停止旋转电位器。
 6. 将捕捉到的示波器波形记录下来。
- (1) PWM 示波器轨迹

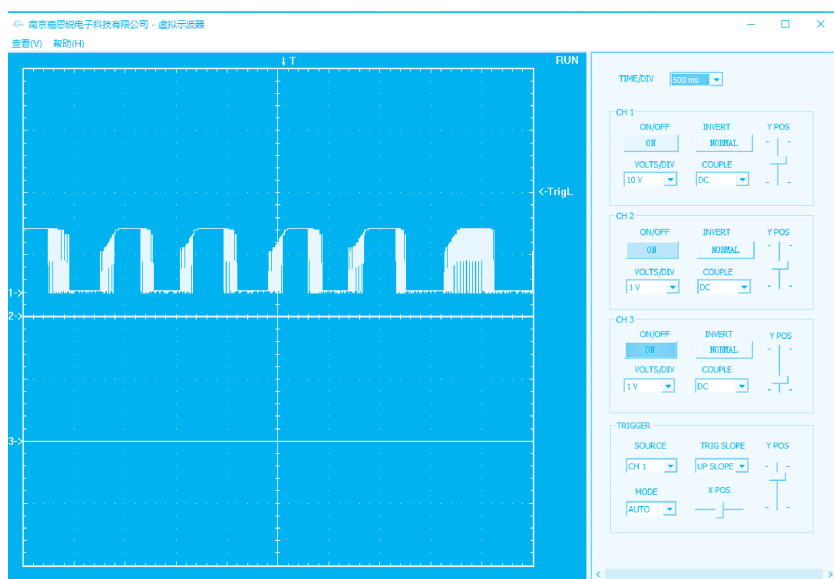


图 2-57 500 ms 虚拟示波器的 PWM 电路信号轨迹

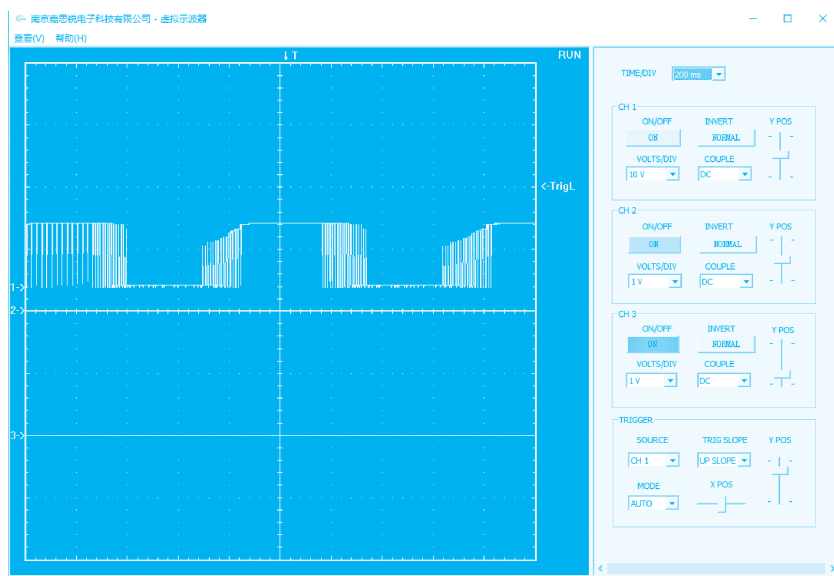


图 2-58 200 ms 虚拟示波器的 PWM 电路信号轨迹

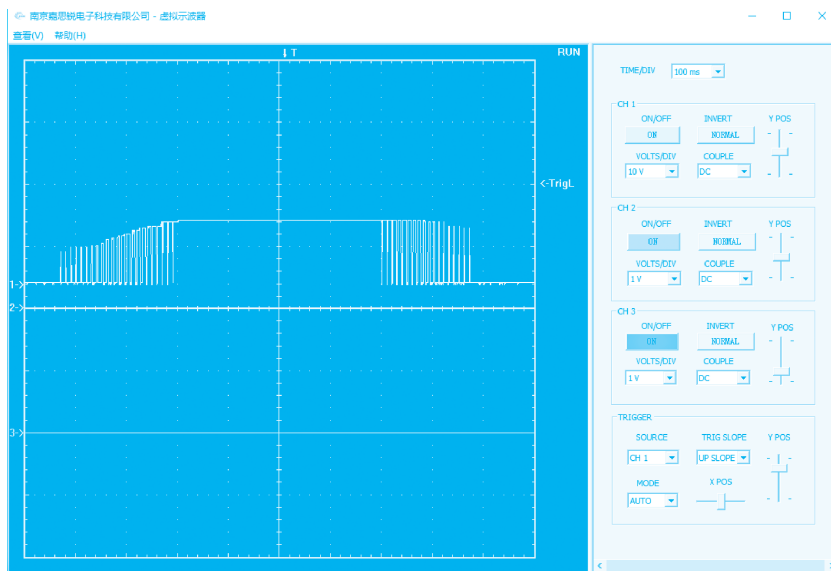


图 2-59 100 ms 虚拟示波器的 PWM 电路信号轨迹

(2) 结论

在半波范围内的电压上升状况受到脉冲宽度调制的控制。

自我评估



- 脉冲宽度调制通常所用的缩略语是什么? ()
A. PuMo B. PWM C. PWEM D. PWE
- 脉冲宽度调制电压用于车辆中的哪些电路? ()
A. 用于调整车灯亮度 B. 用于控制阀门
C. 脉冲宽度调制在车辆中没有任何应用
- 脉冲宽度调制如何生成? ()
A. 通过关闭电压 B. 通过开启电压
C. 通过使电压开启和关闭
- 当脉冲宽度增加时,电压有何表现? ()
A. 所得电压不变 B. 所得电压升高
C. 所得电压降低
- 当脉冲宽度增加时,电流有何表现? ()
A. 所得电流增大 B. 所得电流减小
C. 所得电流不变



任务5 正半波与负半波的生成

一、交流电生成

现在通过图 2-60 “简化电路”演示交流电压与电流如何生成的。实验卡 (VDX1901B003) 上的开关 S1 和 S2 应交替切换, 生成交流电。

注意: 禁止使开关 S1 和 S2 同时处于开启状态 (即: 同时按下开关 S1 和 S2)。

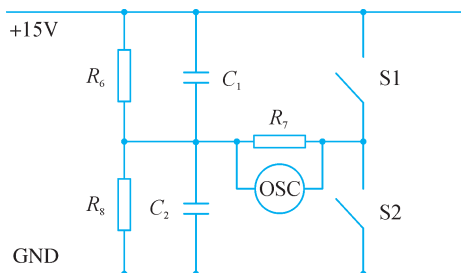


图 2-60 交流电生成电路原理图

该电路能够将一个直流电压转换为一个交流电压。电路的左侧是一个电压分压器, 两个相同的电阻器 R_6 和 R_8 串联在一起。如果在该电路两端加一个 15 V 的直流电压, 那么该电压分压器的中点电压值是 7.5 V。

为了更好地理解, 该电路可以分解为多个子电路。输出电路中的电容器 C_1 、 C_2 可被看作电源, 则该电路自身可以表示为一个开路的电路。

当电路开关 S1 闭合时, 观察图 2-61 电流通过负载的方向, 电流应该从右向左流动, 流经负载 R_7 。

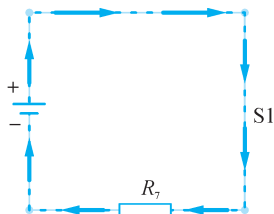


图 2-61 上半部区域电路电流流动方向

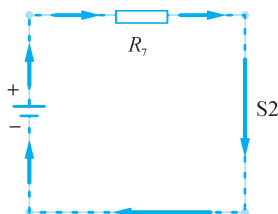


图 2-62 下半部区域电路电流流动方向

下半部区域电路的右侧也是一个简单电路。

当电路开关 S2 闭合时, 观察图 2-62 电流通过负载的方向, 电流应该从左向右流动, 流经负载 R_7 。

为了得到持续的电流, 需要通过一个充电器供电。

如果开关 S1 和 S2 交替开启, 可以看到流经负载 R_7 电流方向交替变化, 生成图 2-63 交流电压。



通过以上学习,我们已经了解了上半波和下半波的生成原理,那么下面我们将自己尝试生成交流电压。

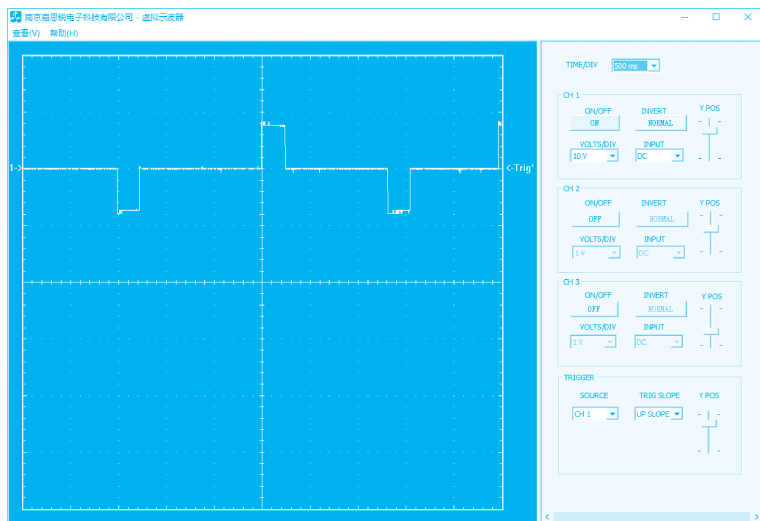
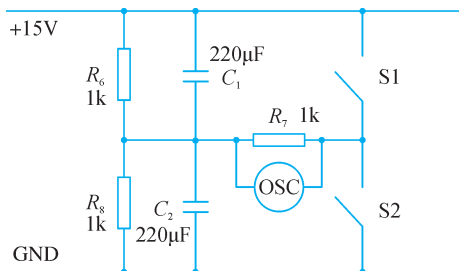


图 2-63 交流电波形

自我评估



根据下面电路回答问题:



1. 在该电路中什么元件可以被视为一个电压源? ()
 A. R_6 B. R_8 C. C_1 D. C_2
 E. R_7 F. S1 G. S2
2. 在该电路中什么元件可以被视为负载? ()
 A. R_6 B. R_8 C. C_1 D. C_2
 E. R_7 F. S1 G. S2



技能训练六 交流电压生成

目的



通过有规律地交替按压开关 S1 和 S2,生成正电压与负电压。

实施步骤



步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

连接 PWM 发生器的导线/跳线	连接至…
连接插头(跳线)	X3(+15 V)
连接插头(跳线)	X7(GND)
连接插头(跳线)	X6

测量导线	连接至…
CH1 红	R_7 X4
CH1 黑	R_7 X5

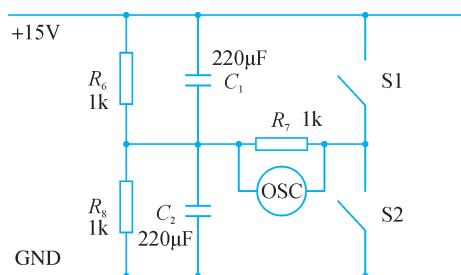


图 2-64 交流电生成原理图

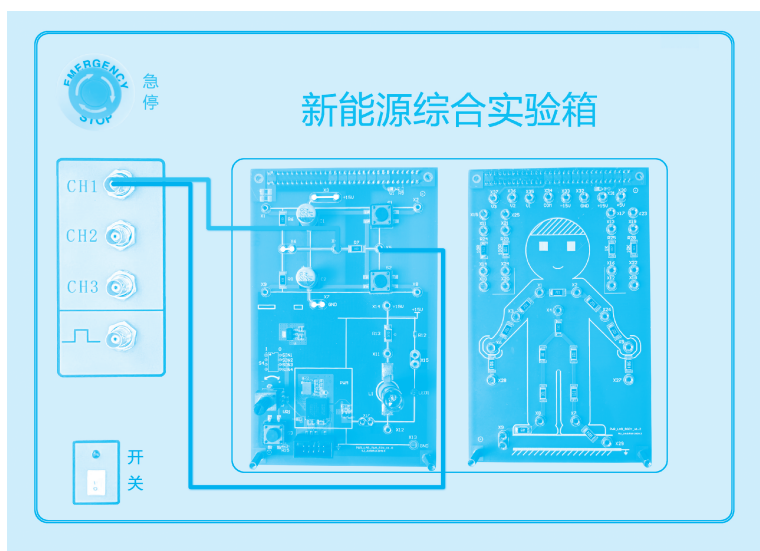


图 2-65 交流电生成线路连接图

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:
TIME/DIV(500 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

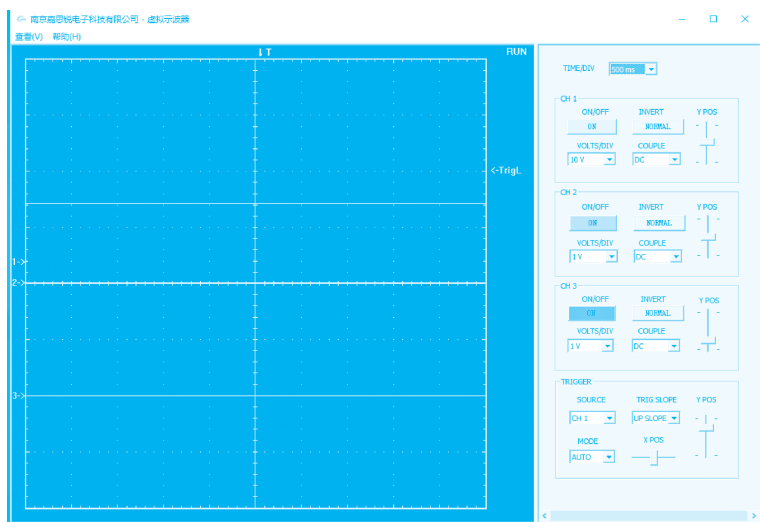


图 2-66 交流电生成测试虚拟示波器 500 ms 设置

3. 交替按压开关 S1 和 S2。动作应缓慢并且保持规律间隔。
4. 不得同时按压开关 S1 和 S2。(为什么?)
5. 记录示波器波形:PWM 示波器描述。

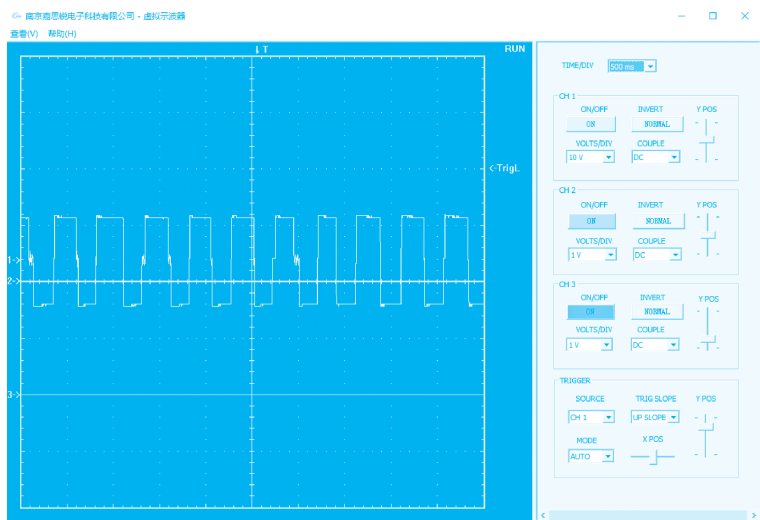


图 2-67 交流电生成测试图

自我评估



1. 如果仅按压开关 S1,会出现何种信号? ()
 - A. 生成一个 AC 电压
 - B. 生成一个 DC 电压
 - C. 电压不会有任何变化
2. 如果仅按压开关 S2,会出现何种信号? ()
 - A. 电压不会有任何变化
 - B. 生成一个 AC 电压
 - C. 生成一个 DC 电压
3. 如果交替按压 S1 和 S2,会出现何种信号? ()
 - A. 电压不会有任何变化
 - B. 生成一个 DC 电压
 - C. 生成一个 AC 电压

二、正弦波电流生成

1. 电路的自动化

当开关 S1 和 S2 交替开启数次后,产生的信号实际上属于一种脉冲宽度调制信号,该信号会产生一种粗略的正弦波电流。不过,由于人工控制信号难度大,PWM 模块可以用于取代这些开关。此类 PWM 模块需要按逻辑方式连接在一起。

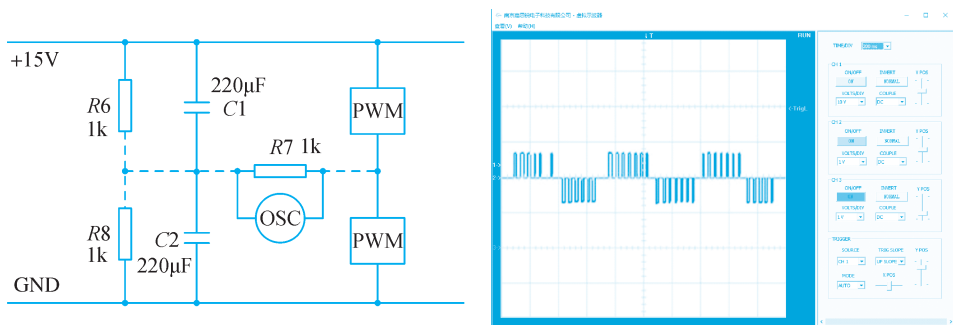


图 2-68 交流电自动生成原理图

图 2-69 是 PWM 模块按逻辑方式连接在一起,取代开关 S1、S2,用示波器采集到的描述。

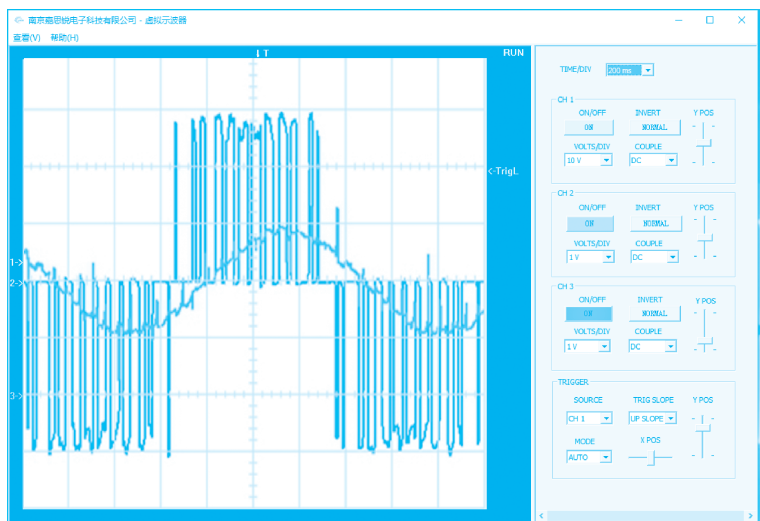


图 2-69 交流电自动生成测试图

2. 手动生成正弦波电流

技能训练七 正弦波电流



目的

手动生成一个脉冲宽度调制信号(生成正弦波电流)。



实施步骤

步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开



关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

连接 PWM 发生器的导线/跳线	连接至...
连接插头(跳线)	X3(+15 V)
连接插头(跳线)	X7(GND)
连接插头(跳线)	X6

测量引线	连接至...
CH1 红	R_7 X4
CH1 黑	R_7 X5

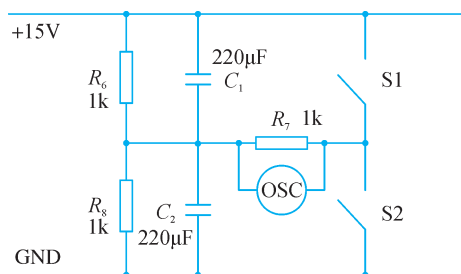


图 2-70 交流电生成原理图

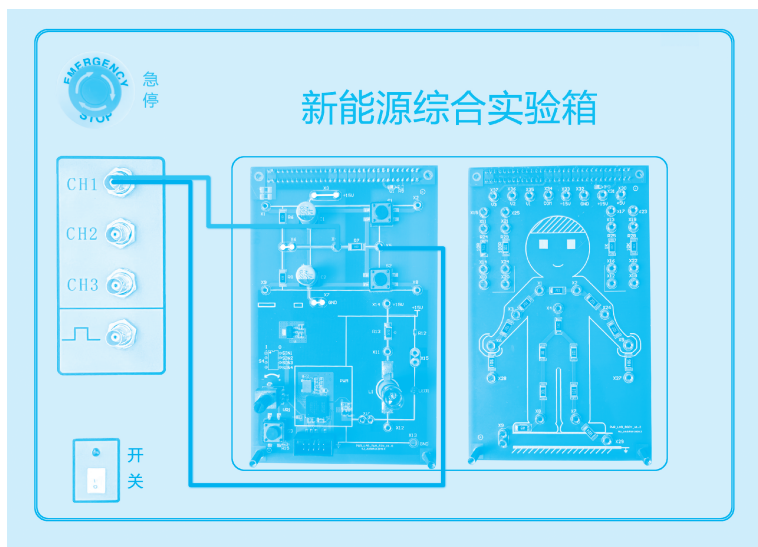


图 2-71 交流电生成线路连接图

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1:



TIME/DIV(500 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

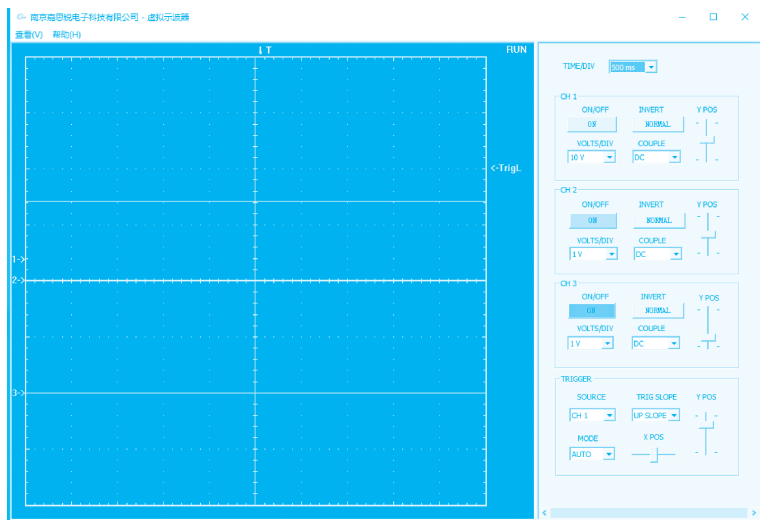


图 2-72 交流电生成测试虚拟示波器 500 ms 设置

TIME/DIV(1 s),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

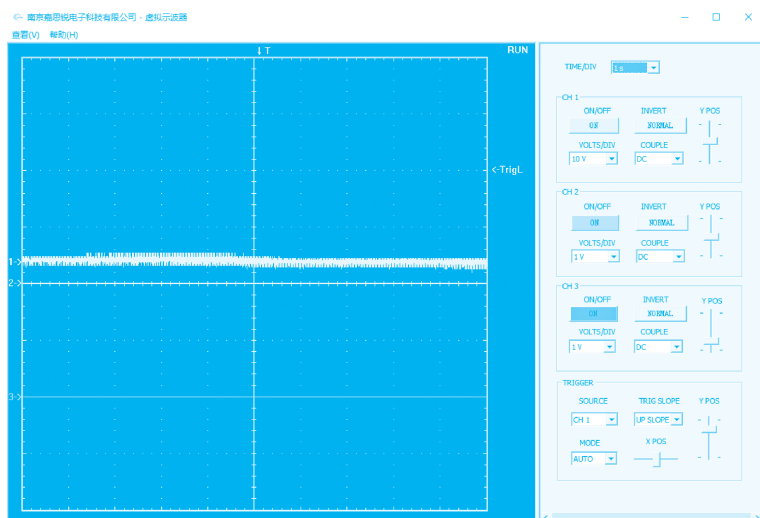


图 2-73 交流电生成测试虚拟示波器 1 s 设置

3. 连续按压开关 S1 数次,就好像 PWM 发生器在进行切换那样。然后,连续按压开关 S2 数次,同样就好像 PWM 发生器在进行切换那样。

注意:不得同时按压开关 S1 和 S2。



4. 记录示波器波形。

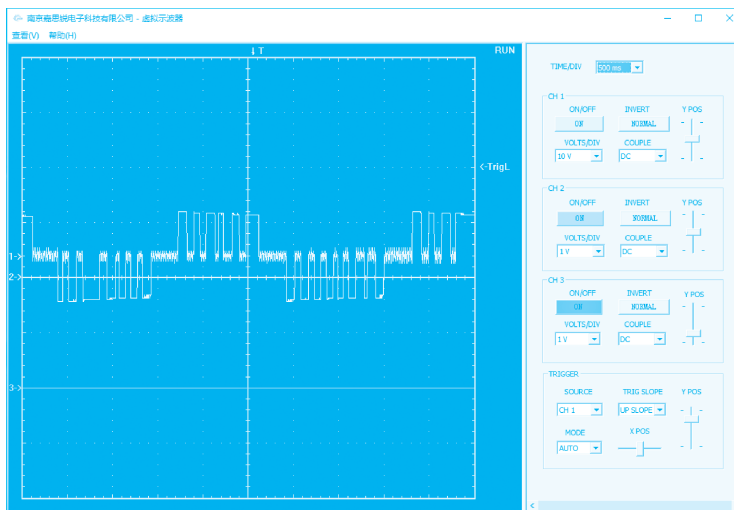


图 2-74 测试虚拟示波器 500 ms 设置交流电生成波形

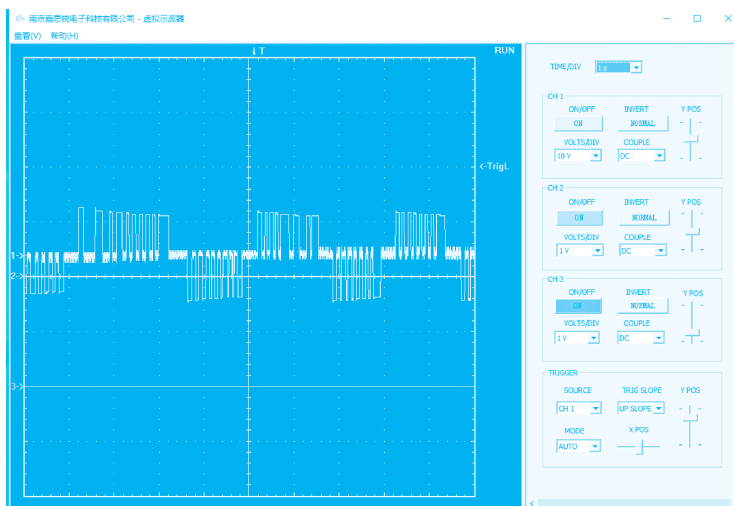


图 2-75 测试虚拟示波器 1 s 设置交流电生成波形

自我评估



- 当把开关 S1 接连接按压数次时,会出现何种信号? ()
A. 一个正弦波信号 B. 一个 PWM 信号 C. 一个 AC 信号
- 当把开关 S2(而非开关 S1)接连接按压数次时,您会观察到什么现象? ()
A. 当 S1 被开启和关闭时,电压的方向相反。
B. 当 S1 被开启和关闭时,电压的方向相同。



3. 如果开关 S1 和 S2 被交替按压接连数次,会生成什么信号? ()
- A. 脉冲宽度调制 AC 电压 B. 短路

任务 6 三相逆变器

以上内容,我们研究的是一种单相系统。如果把该系统扩展为具有三个半桥,便可以建立一种能驱动三相电机的三相系统。

图 2-76 显示了包含三个“自动电路”的一个三相电机控制系统的简化图。

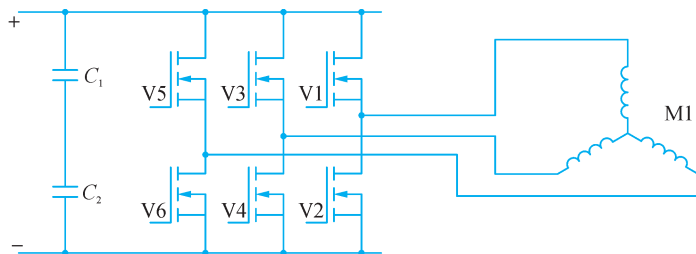


图 2-76 三相电机控制系统的简图

驱动电机系统的控制中心,又称智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM),是电力电子领域中的一种集成化、智能化的功率控制模块。它集成了功率开关器件、驱动电路、保护电路以及控制电路等,能够实现对电机的高效、精确控制。以 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管)模块为核心组件,辅以驱动集成电路、主控集成电路。

控制部分则提供 PWM 决定功率晶体管开关频度及换流器换相的时机。其中每个半桥均负责该电路的一个相。顶端功率晶体管通过正半波进行切换,而底部功率晶体管则通过负半波进行切换。这三个相彼此之间按 120° 或 240° 进行移相。

1. 电路图

根据图 2-77 说明各部分的功能,指出逆变器模块。

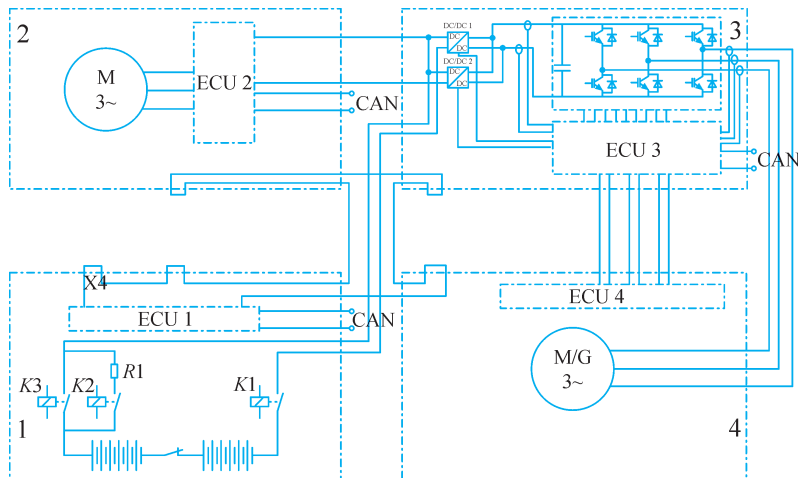


图 2-77 某电动汽车功能原理图



图例中模块说明:

- 部件 1: 带电池断电系统的高压电池、正负接触器、预充接触器、预充电阻、ECU1 (BMS-电池管理系统) 和充电用插头。
- 部件 2: ECU2(控制电子装置)的高压空调压缩机。
- 部件 3: ECU3(控制电子装置)的逆变器, 直流/直流变换器和电源电子装置。
- 部件 4: ECU4(测量和监控电子装置)的驱动电机/发电机。

自我评估



图中哪部分是电机控制器和逆变器?

2. 现代 Ioniq 5 的逆变器

图 2-78 这个全碳化硅逆变器, 主要的部件围绕 HybridPACK 驱动模块 (FS03MR12A6MA1B/Infineon), 并且在 400 V DC 输入充电的情况下, 逆变器使用电机的电感作为升压斩波器进行升压。

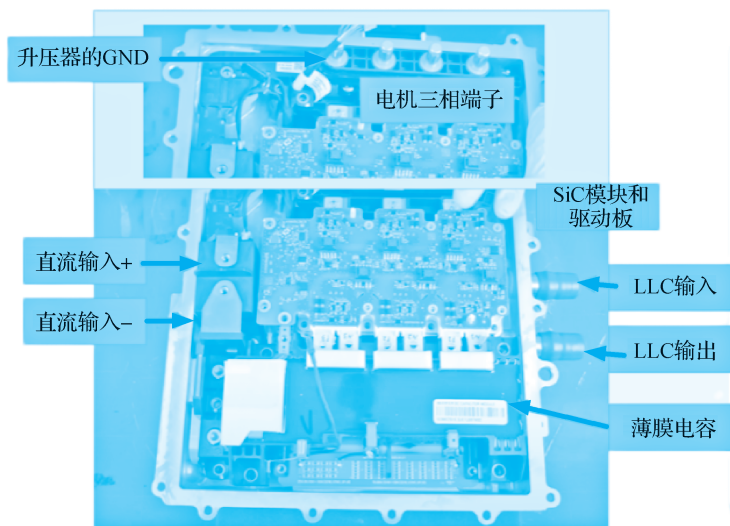


图 2-78 现代 Ioniq 5 的逆变器概况

图 2-79 是逆变器主要的部件概览: 控制板在背面, 主要包括薄膜电容、SiC 模块、驱动板、放电板、母线排、高压接触器、电流传感器总成和连接端子。

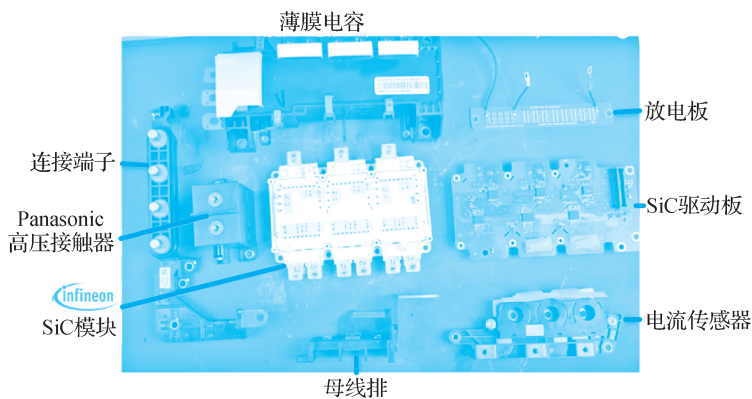


图 2-79 现代 Ioniq 5 的逆变器主要部件

3. 实验卡和实车关系

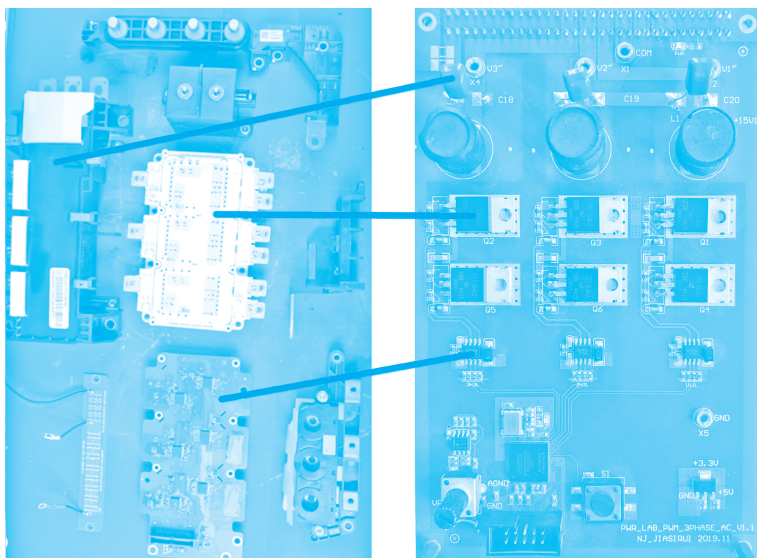


图 2-80 现代 Ioniq 5 的逆变器和实验卡主要部件对应关系

技能训练八 三相交流电的生成



逆变器产生一个三相交流电。



实施步骤



步骤一 根据原理图,用提供的导线连接各端子,确保在实验箱开关关闭的状态下(开关置于“○”位置,红色指示灯熄灭)插入实验板卡。

用导线连接各端子。

测量导线	连接至…
CH1 红色	X2
CH1 黑色	X1(公共端)
CH2 红色	X4
CH2 黑色	X1(公共端)
CH3 红色	X3
CH3 黑色	X1(公共端)

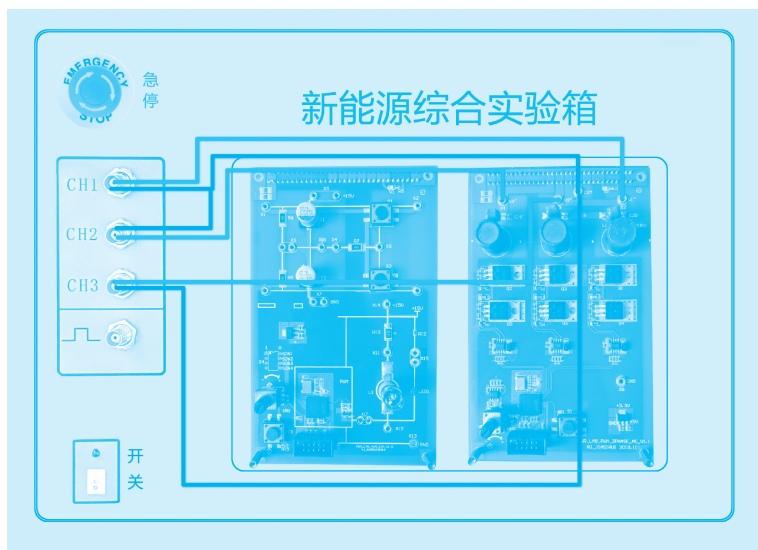


图 2-81 逆变器测试接线

步骤二

1. 接通面板电源开关(置于“|”位置),红色指示灯亮。
2. 打开虚拟示波器(桌面→虚拟示波器.exe)。如下设置 CH1、CH2、CH3:
TIME/DIV(10 ms),ON/OFF(ON),VOLTS/DIV(10 V),COUPLE(DCT)

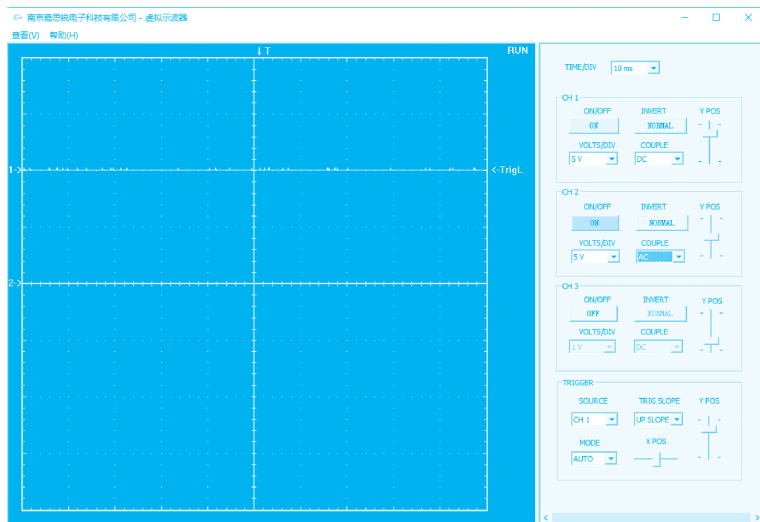


图 2-82 示波器设置

3. 调试示波器, 捕捉到一条好看的波形。
4. 将捕捉到该示波器的波形记录下来。

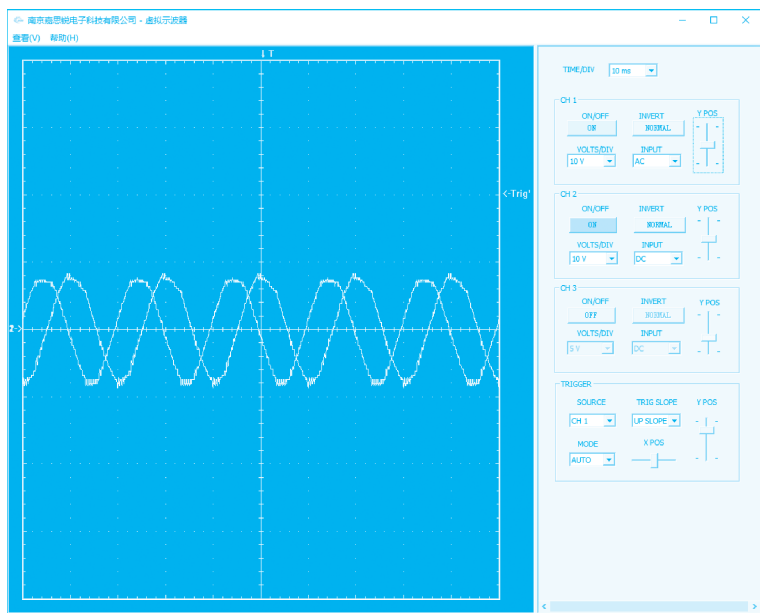


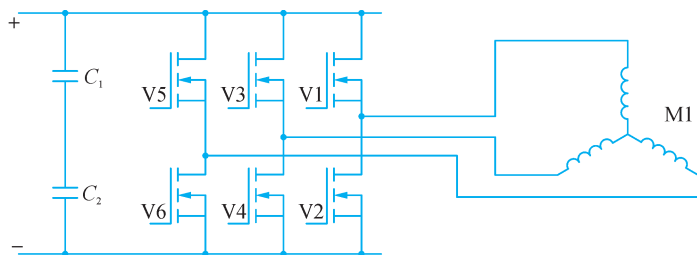
图 2-83 逆变器生成波形轨迹



自我评估



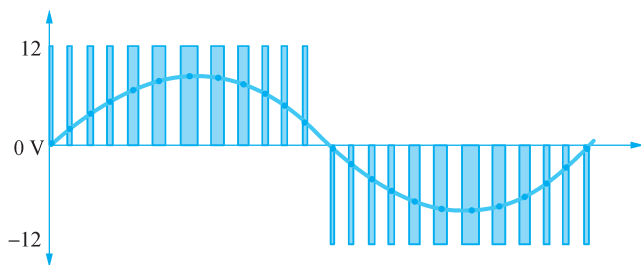
根据电路回答问题。



1. 控制部分提供()决定功率晶体管开关频度。
A. PuMo B. PWM C. PWEM D. PWE
2. 在该电路中什么元件可以被视为负载? ()
A. V1 B. C₂ C. C₁ D. M1
E. V2 F. V3 G. V4 H. V5
I. V6

任务7 总结——PWM 与交流电(AC)

如果要改变每个半波的电压大小,则需要使用一个脉冲宽度调制信号(PWM)。如果 PWM 发生器被用于生成正、负两种半波,那么就会产生两个因脉冲宽度而改变的电压。随后这些电压会生成正弦波电流,生成一个磁场。



1. 空间矢量 1

为了让一台三相电机的转子旋转,需要在定子内部建立一种旋转磁场。以下描述意在说明这一过程。

正弦波电流通过一个线圈绕组。这会形成与该电流瞬时值成正比的一个磁通量。由于电流按正弦波方式变化,该磁场的强度也按相同方式变化。

磁场的振幅与方向由一个矢量来表示,该矢量的长度持续变化,但其空间准直保持不变。该磁场的符号通过其矢量呈现的两个可能方向中任一方向来表明。

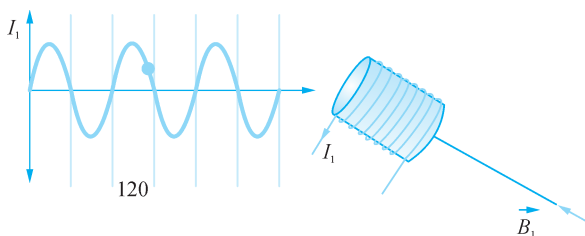
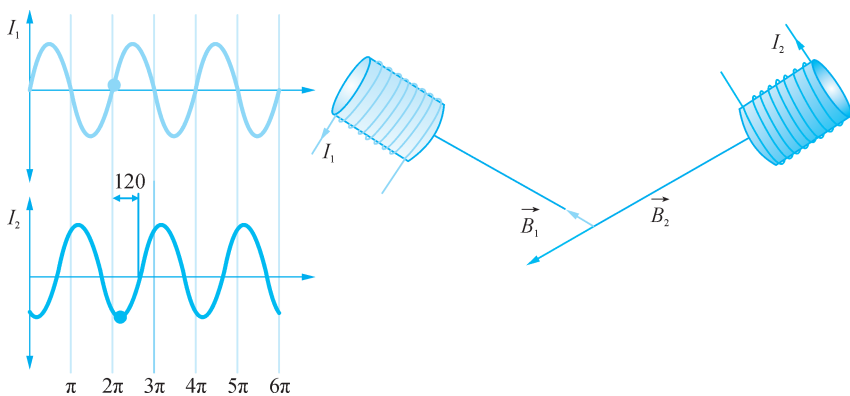


图 2-84 一个通电线圈生成的磁场

2. 空间矢量 2

如果在该电路中加入第二线圈,则有以下情形。第二线圈中的电流 I_2 按照与第一线圈中电流 I_1 成 120° 角的关系作相移。此外,第二线圈的物理定位也与第一线圈成 120° 角。

第二线圈 B_2 所产生磁场的矢量也同电流 I_2 的正弦波变化成比例。因此,这也是相对于 B_1 的 120° 角相移,意味着在两个正弦波振荡之间存在时间延迟。由于这些线圈彼此之间呈 120° 角关系,表示 B_2 场的矢量的准直在空间中也以 120° 角的方式变换。

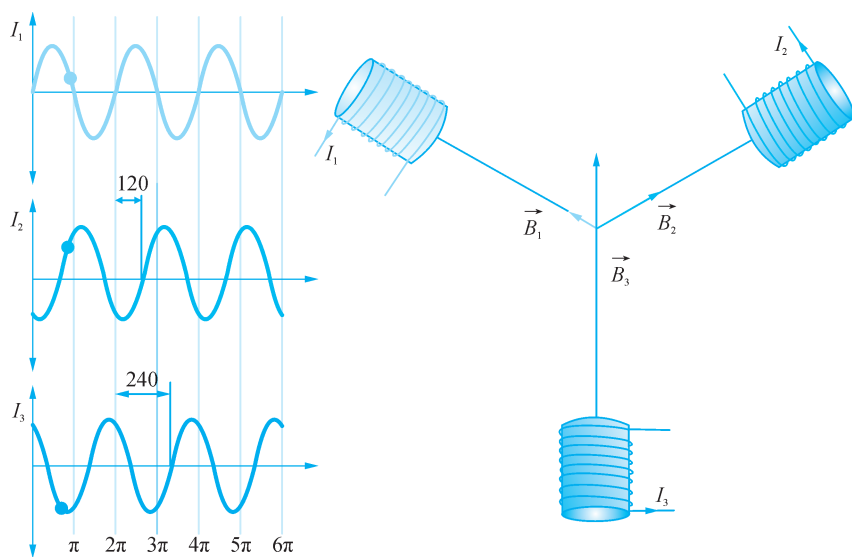
图 2-85 夹角 120° 第二个通电线圈生成的磁场

3. 空间矢量 3

如果在该电路中加入第三线圈,则有以下情形。第三线圈中的电流 I_3 按照与第一线圈中电流 I_1 成 240° 角的关系作相移。此外,第三线圈的物理定位也与第一线圈成 240° 角。

第三线圈 B_3 所产生磁场的矢量也同电流 I_3 的正弦波变化成比例。因此,这相对于 B_1 也是按 240° 作相移,而在这些振荡之间也有响应的时间延迟。由于这些线圈彼此之间呈 240° 角关系,表示 B_3 场的矢量的准直在空间中也以 240° 角的方式变换。

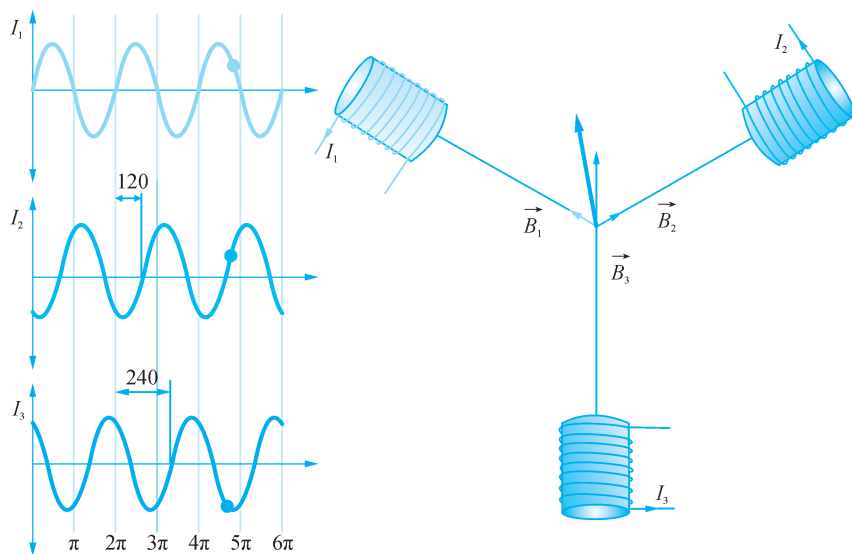
应该可以在结果中识别出其中每个单独空间矢量,并且应该看得出它们的长度在变化而空间准直则未变。

图 2-86 夹角 120° 第三个通电线圈生成的磁场

4. 合成矢量

这些定子中的三个磁场一个附加在另一个之上,叠加形成一个合磁场。

通过对这三个空间矢量进行矢量和计算可以清楚地显示这一结果。该代表合磁场的矢量和在周期全过程中保持恒定振幅,不过其空间准直有变化。这就是旋转磁场形成的方式。

图 2-87 三个夹角 120° 通电线圈生成的合磁场

如果一台三相电机的定子绕组被连接至一个三相电源的三个相上,在定子自身内部会产生相对称的旋转磁场。其旋转速度取决于供电电压变化的频率。

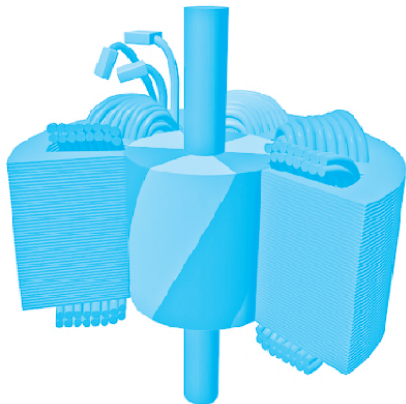
5. 旋转(三相)场总结

如果在旋转磁场内部放置一个永磁转子,这两个磁场的彼此影响会使转子开始转动。



在实践中,由于切换过程的存在,三相交流电流并不会显得完全“流畅”。为了使电机流畅运转,转子上的永磁场可以设定成一个角度。

生成三相正弦波交流电流是形成旋转电场的前提。



自我评估



1. 什么因素会产生一个正弦波电流? ()
 - A. 辅助载波频率
 - B. 负载两端受精确控制的振幅调制电压
 - C. 负载两端受精确控制的脉冲宽度调制电压
2. 什么力可以解释磁场中载流导体的运动? ()
 - A. 正弦力
 - B. 洛伦兹力
 - C. PWM 合力
3. 什么会导致旋转三相场的形成? ()
 - A. 线圈的磁场
 - B. 将一个三相电源连接至一个线圈
 - C. 线圈中各个磁场的和
4. 生成三相电场的先决条件是什么? ()
 - A. 单相正弦交流电
 - B. 双相正弦交流电
 - C. 三相正弦交流电
 - D. 单相正弦直流电
 - E. 双相正弦直流电
 - F. 三相正弦直流电

祝贺您! 您已经完成了“汽车 DC/AC 逆变器原理”课程