



驱动电机结构原理

本项目主要介绍驱动电机的基本作用、基本结构、基本工作原理以及旋转变压器结构原理，分为八个任务进行学习：

- 任务一 驱动电机概述
- 任务二 直流电机
- 任务三 永磁电机
- 任务四 异步电机
- 任务五 开关磁阻电机
- 任务六 轮毂电机
- 任务七 比亚迪 E6 驱动电机结构原理与检测
- 任务八 旋转变压器

任务一



驱动电机概述

知识目标

- ➔ 了解驱动电机的功能特点。
- ➔ 熟悉纯电动汽车驱动电机常见的类型。

技能目标

- ➔ 会读驱动电机的性能参数。



学习内容

一、驱动电机的功能和特点

电机,也称驱动电机,是一种将电能转化成机械能,并可以再使机械能产生动能,用来驱动其他装置的电气设备。

驱动电机对于电动汽车来说就像人的心脏一样重要,它负责给整车提供驱动力,是电动汽车驱动系统的核心部件之一,如图 2-1 所示。

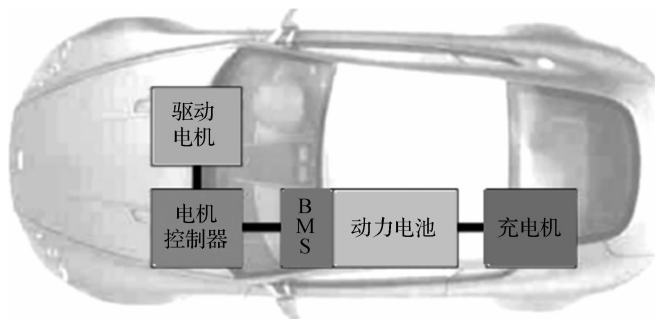


图 2-1 电动汽车主要部件



纯电动汽车的驱动电机需要在各个转速下均能够产生转矩。图 2-2 所示为汽车驱动电机转速与转矩的关系,该曲线被称为转速转矩曲线。汽车驱动电机在中速以下时要求恒定功率输出,转矩与速度组合决定电机的运转情况,根据坡道起步、急加速、行驶区域、高速巡航等不同的行驶状态,电机的运转情况会发生很大的变化。

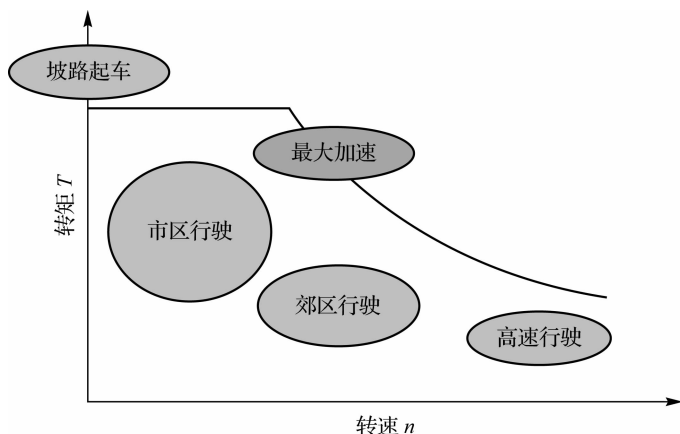


图 2-2 汽车驱动电机转速与转矩的关系

电动汽车采用的驱动电机有以下特点:

(1)体积小、功率密度大。由于电动汽车的整车空间有限,因而电动汽车驱动电机的第一个特点是结构紧凑、尺寸要小。这就意味着电机系统(驱动电机+电机控制器)的尺寸将受到很大的限制,电机设计厂家必须想尽办法缩小驱动电机的体积,即提高电机的功率密度和转矩密度。尤其是民用乘用车,对电机的体积限制要求很高,因此业内一般选用高功率密度的永磁同步电机作为驱动电机解决方案。

(2)效率高、高效区广、质量小。电动汽车驱动电机的第二个特点就是效率要高、高效区要广、质量要小。续航里程一直是电动汽车的短板,而提升续航里程的方法就是提升驱动电机的效率,保证每千瓦·时电都能发挥最大的用处。驱动电机的高效工况区要够广,保证汽车在大部分工况下都处于高效状态。减小电机质量,也能间接降低整车的功耗,实现续航里程提升,如图 2-3 所示。

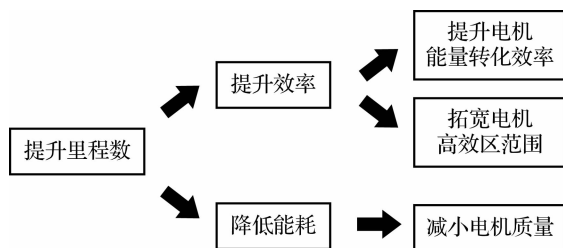


图 2-3 提升续航里程的方法

(3)安全性与舒适度好。基于用户体验的考虑,电动汽车驱动电机还需关注电机自身的安全性和舒适度。安全性可以理解为电机的可靠性,即电机在恶劣环境下能否正常工作。

可通过高低温箱试验来进行安全性检测。舒适度,即电机在运行时是否使驾乘人员体感不适,关注的是电机运行时的振动和噪声情况。提升安全性与舒适度的方法如图 2-4 所示。

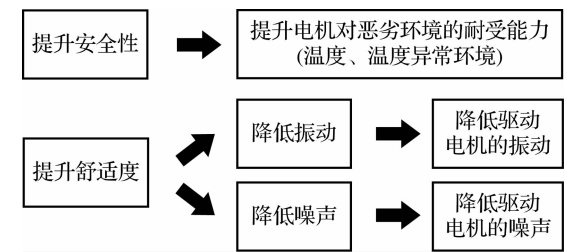


图 2-4 提升安全性与舒适度的方法

二、驱动电机的类型

在纯电动汽车上,电机是唯一的驱动装置,最常采用的电机为直流电机、交流异步电机、永磁同步电机和开关磁阻电机等。电动汽车可选用的驱动电机类型如图 2-5 所示。

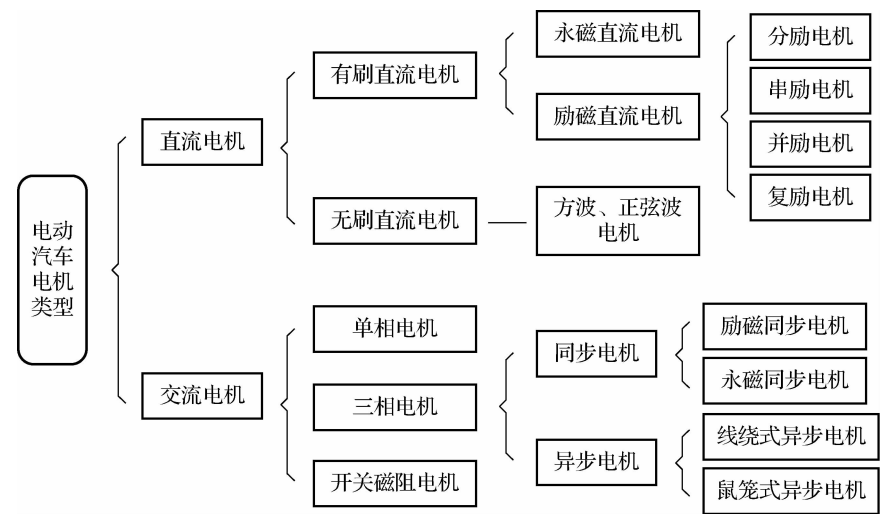


图 2-5 电动汽车可选用的驱动电机类型

各种电机性能比较见表 2-1。

表 2-1 各种电机性能比较

性能及类型	直流电机	交流异步电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
转速范围/(r·min ⁻¹)	4 000~6 000	12 000~20 000	4 000~10 000	>15 000
功率密度	低	中	高	较高
负荷效率/%	80~87	90~92	85~97	78~86
峰值效率/%	85~89	94~95	95~97	85~90
结构坚固性	差	好	好	好

续表

性能及类型	直流电机	交流异步电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
可靠性	一般	好	好	好
电机外形尺寸	大	中	小	小
电机质量	大	中	小	小
控制器成本	低	高	高	一般
过载能力/%	200	300~500	300	300~500
功率因数/%	—	82~85	90~93	60~65
10%负荷时的效率/%	88~91	79~85	90~92	78~86
最高效率/%	85~89	94~95	90~97	90
恒功率区比例	—	1 : 5	1 : 2.25	1 : 3
安全性	中	高	低	高
控制操作性能	最好	好	好	好
电动机成本	高	低	高	较高
控制器成本	高	高	高	一般
单位输出功率相对成本	1.0 元 · kW ⁻¹	0.8~1.2 元 · kW ⁻¹	1~1.5 元 · kW ⁻¹	0.6~1.0 元 · kW ⁻¹

三、驱动电机的主要性能参数

(1)额定电压 U_e (V)。额定电压即电机在额定运行时定子绕组应输入的线电压值。一般小型直流电机的额定电压为 36~48 V,单相交流电机的额定电压为 220 V,三相交流电机的额定电压为 380 V,特种电机的额定电压可达 500 V。

(2)额定电流 I_e (A)。额定电流即电机在额定电压下,电机轴上输出的机械功率为额定功率时,定子绕组通过的线电流值。

(3)频率 f (Hz)。频率指的是三相电流的频率。我国采用 50 Hz 的三相电流,外国多采用 60 Hz 的三相电流。

(4)额定转速 n (r/min)。额定转速即电机在指定频率(我国为 50 Hz)、额定电压下,电机轴上输出的机械功率为额定功率时的电机的转速。

(5)额定功率 P_e (kW)。电动机的额定功率是指电机在额定运行(额定电压、额定频率、额定负载)条件下,转轴上输出的机械功率。

(6)峰值功率 $P_{\max}$ (kW)。峰值功率即在一瞬间电机最大的承受功率,电机的峰值功率为额定功率的 2~3 倍。

(7)效率(%)。效率即电机输出机械功率与输入电功率之比,通常用百分比表示。

(8)温升(℃)。温升指电机在运行时允许升高的最高温度。



练习与思考

一、填空题

1. 驱动电机对于电动汽车来说就像人的_____一样重要,它负责给整车提供_____,是电动汽车驱动系统的_____部件之一。
2. 额定电压 U_e (V) 是指电机在_____运行时,电机_____应输入的_____值。
3. 额定电流 I_e (A) 是指电机在_____电压下,电机轴上输出_____为额定功率时,电机_____通过的_____值。
4. 频率 f (Hz) 是指三相电流的频率,我国采用_____的三相电流,外国多采用_____的三相电流。
5. 额定转速 n (r/min) 是指电机在_____的频率(我国为 50 Hz) 时,电机在_____下,电机输出轴上输出的_____为_____时的电机的转速。
6. 额定功率 P_e (kW) 是指电机在_____运行时电机轴上输出的_____。

二、简答题

1. 电动汽车采用的驱动电机有哪些特点?
2. 电动汽车上最常采用哪些电机?

任务二



直流电机

知识目标

- ➔ 了解直流电机的组成结构。
- ➔ 掌握直流电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 能认识直流电机相关器件。
- ➔ 懂得直流电机的应用。



学习内容

一、直流电机的工作原理

直流电机的工作原理如图 2-6 所示。

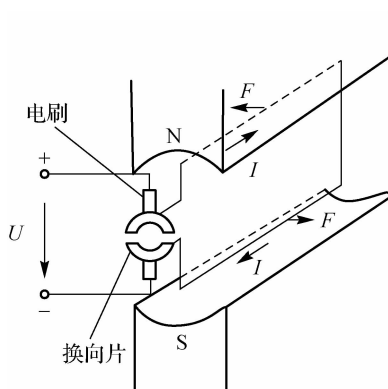


图 2-6 直流电机的工作原理

在磁场 N 极和 S 极之间装有一个可以转动的线圈(电枢绕组),线圈的首末两端分别接到两片圆弧形的换向片(铜片)上,两个换向片之间、换向片与转轴(与线圈一起旋转)之间均相互绝缘,为了把电枢绕组和外电路接通,在换向器上安置了两个固定不动的电刷。由于电刷和电源固定连接,因而无论线圈怎样转动,总是上半边的电流向里,下半边的电流向外,由电磁感应原理可知,通电线圈在磁场中受到逆时针方向的力矩作用,虽然电流方向是交替变化的,但所受电磁力的方向不改变,因此线圈可以连续地按逆时针方向转动。

二、直流电机的构造

直流电机由定子与转子两大部分构成,定子和转子之间的间隙称为气隙,其结构如图 2-7 所示。

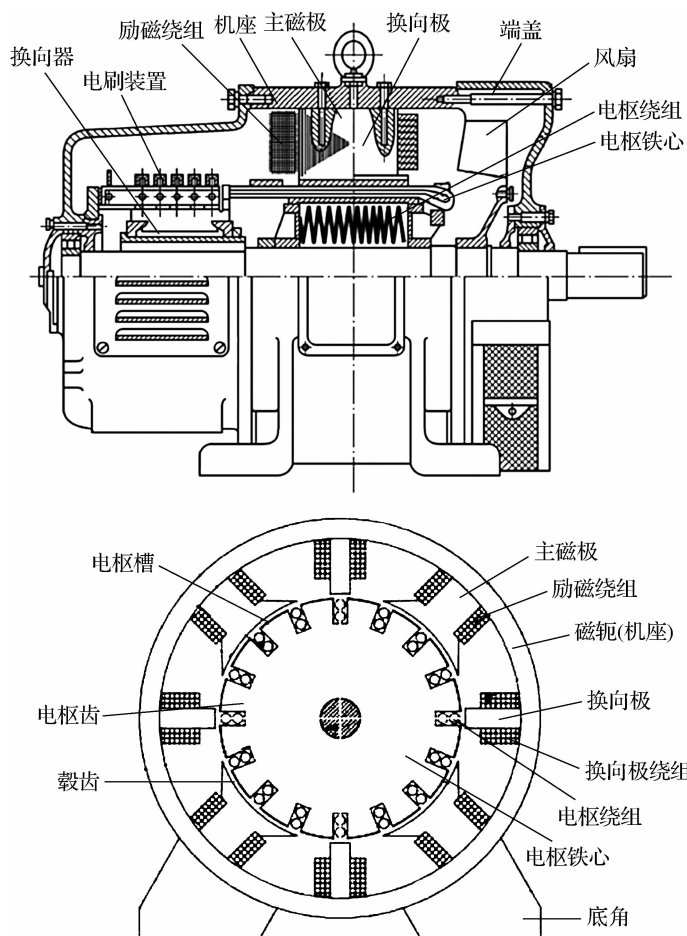


图 2-7 直流电机结构

1. 定子部分

直流电机的定子主要由主磁极、机座、换向极和电刷装置等组成,如图 2-8 所示。

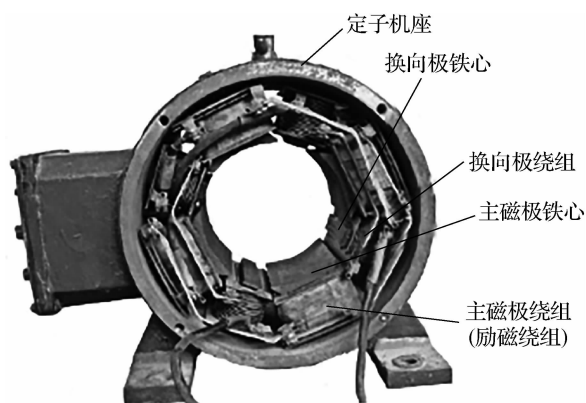


图 2-8 直流电机定子

(1)主磁极。主磁极的作用是建立主磁场,它由主磁极铁心和套装在铁心上的励磁绕组构成。

(2)机座。机座用铸钢或厚钢板焊接而成,它既是主磁路的一部分,又是电机的结构框架。

(3)换向极。换向极的作用是改善直流电机的换向情况,使直流电机运行时不产生有害的火花。它由换向极铁心和套装在铁心上的换向极绕组构成。

(4)电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、汇流排等组成,用于电枢电路的引入或引出,如图 2-9 所示。

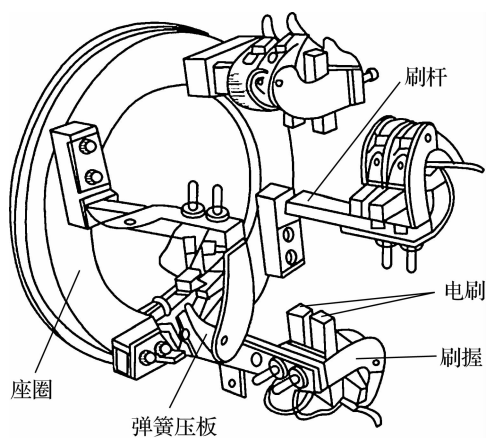


图 2-9 直流电机的电刷装置

2. 转子部分

转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器等,如图 2-10 所示。

(1)电枢铁心。电枢铁心既是主磁路的组成部分,又是电枢绕组的支撑部分。

(2)电枢绕组。电枢绕组由扁铜线或圆铜线按一定规律绕制而成,它是直流电机的电路部分,也是产生电动势和电磁转矩进行机电能量转换的部分。

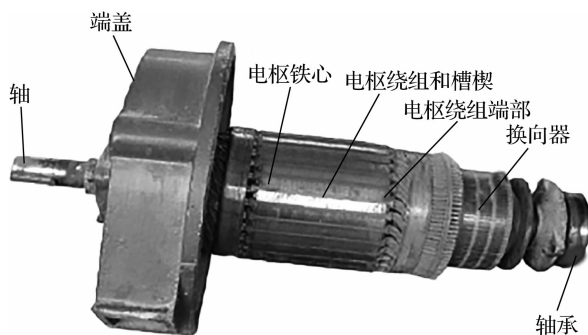


图 2-10 直流电机的转子

(3)换向器。换向器由冷拉梯形铜排和绝缘材料等构成,用于电枢电流的换向。换向器结构如图 2-11 所示。

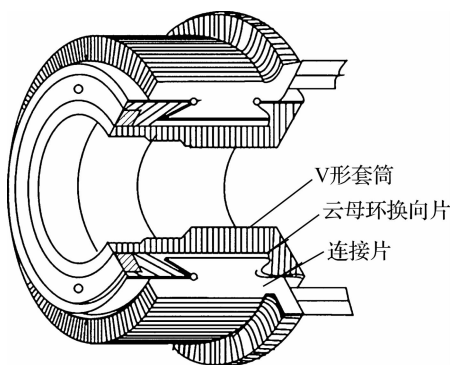


图 2-11 换向器结构

三、直流电机的分类

直流电机的励磁方式指对励磁绕组供电使之产生励磁磁通势而建立主磁场的方法。根据励磁方式,直流电机可分为下列几种类型。

1. 他励直流电机

励磁绕组与电枢绕组无连接关系,而由其他直流电源对励磁绕组供电的直流电机称为他励直流电机,接线如图 2-12(a)所示,图中 M 表示电动机。永磁直流电机也可看作他励直流电机。

2. 并励直流电机

并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组相并联,接线如图 2-12(b)所示。作为并励发电机,是电机本身发出来的端电压为励磁绕组供电;作为并励电动机,励磁绕组与电枢共用同一电源,从性能上讲与他励直流电机相同。

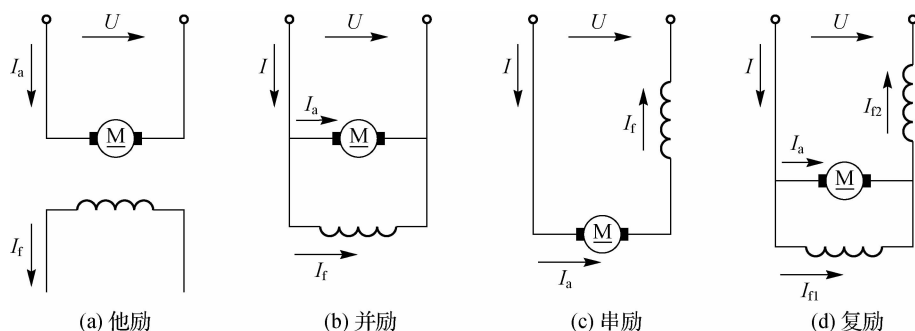


图 2-12 直流电机的励磁方式

3. 串励直流电机

串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联后,再接于直流电源,接线如图 2-12(c)所示。这种直流电机的励磁电流就是电枢电流。

4. 复励直流电机

复励直流电机有并励和串励两个励磁绕组,接线如图 2-12(d)所示。若串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同,则为积复励;若两个磁通势方向相反,则为差复励。

四、直流电机的应用

小功率(小于 10 kW)的驱动电机多用小型高效的永磁式直流电机,一般用在小型、低速的专用车辆上,如电动自行车、高尔夫球车、电动叉车、警用巡逻车等。

中等功率(10~100 kW)的驱动电机用他励、串励或复励式直流电机,可用在结构简单、转矩较大的电动货车上。

大功率(大于 100 kW)的驱动电机用串励式直流电机,可用在要求低速、高转矩的大型专用电动汽车上。



练习与思考

一、填空题

1. 直流电机由_____与_____两大部分构成,_____和_____之间的间隙称为_____。
2. 直流电机定子主要由_____、机座、_____和_____等组成,主磁极的作用是_____,它由主磁极铁心和套装在铁心上的_____构成。
3. 转子部分包括电枢_____、电枢_____、换向器等,电枢铁心既是_____的组



成部分,又是产生_____和_____进行机电能量_____的部分。

4. 根据励磁方式的不同,直流电机可分为_____直流电机、_____直流电机、_____直流电机和_____直流电机。

5. 小功率(小于 10 kW)的驱动电机多用小型高效的_____直流电机,一般用在小型、_____的专用车辆上,如电动自行车、_____、电动叉车、_____等。

6. 中等功率(10~100 kW)的驱动电机用_____、串励或_____式直流电机,可用在结构简单、转矩_____的_____上。

7. 大功率(大于 100 kW)的驱动电机用_____式直流电机,可用在要求_____、高转矩的_____专用_____上。

二、简答题

1. 简述定子部分的组成与作用。
2. 简述转子部分的组成与作用。
3. 简述直流电机的工作原理。

任务三



永磁电机

知识目标

- ➔ 了解永磁电机的组成结构。
- ➔ 掌握永磁电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 能认识永磁电机相关器件。
- ➔ 会区别有刷、无刷永磁电机。



学习内容

一、永磁电机的分类

永磁电机的分类方法很多,根据输入电机接线端波形,其可分为永磁直流电机和永磁交流电机。

由于永磁交流电机没有电刷、换向器和集电环,因而也被称为永磁无刷电机。根据输入电机接线端的交流波形,永磁无刷电机可分为永磁同步电机和永磁无刷直流电机。

二、永磁同步电机的结构与工作原理

同步电机属于交流电机,定子绕组与异步电机相同。它的转子旋转速度与定子绕组所产生的旋转磁场的速度是一样的,因此被称为同步电机。

1. 永磁同步电机的结构

永磁同步电机用永磁体取代绕线式同步电机转子中的励磁绕组,从而省去了励磁线圈、集电环和电刷。永磁同步电机转子分为面装式、嵌入式和内埋式三种基本结构,前两种形式又称为外装结构。

(1)面装式转子结构。面装式转子的永磁体通常呈瓦片形,被安装在转子铁心外表面上,其分类如图 2-13 所示。这种转子结构具有结构、工艺简单,成本低和转动惯量小等优点,多用于中小功率伺服电机中。

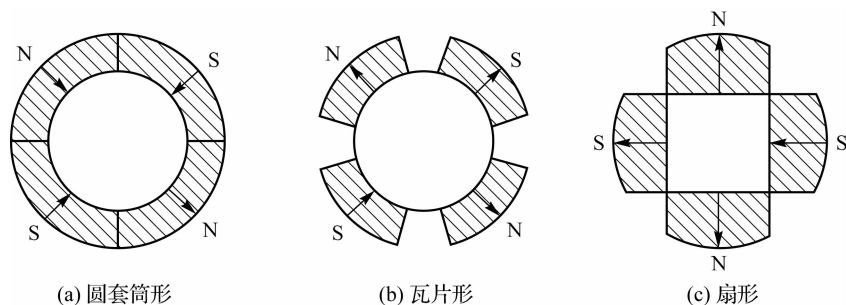


图 2-13 面装式转子永磁体的分类

(2)嵌入式转子结构。嵌入式转子结构是将永磁体嵌于转子表面下,而永磁体的宽度小于一个极距,如图 2-14 所示。永磁体都采用稀土永磁材料,在电磁性能上属于隐极式电机,其直、交轴(d 、 q)同步电感基本相同,转子磁路对称,故嵌入式转子结构的永磁同步电动机在电磁性能上属于面装式电机,其 q 轴同步电感要大于 d 轴同步电感。这种因转子磁路的不对称性而产生的磁阻转矩可以用来提高电机的功率密度,改善动态性能。

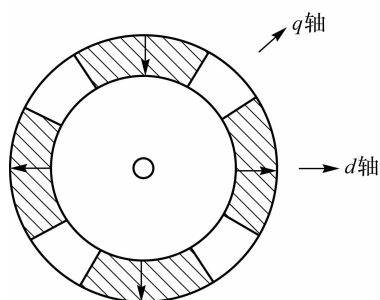


图 2-14 嵌入式永磁转子

(3)内埋式转子结构。内埋式转子结构的永磁体位于转子内部,每个永磁体都被铁心包容,如图 2-15 所示。

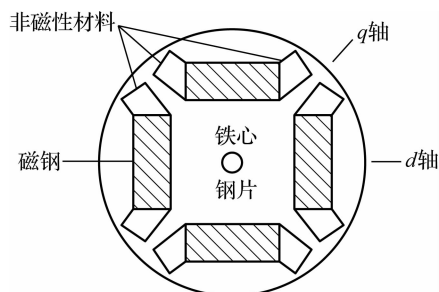


图 2-15 内埋式永磁转子

内埋式转子结构在电磁性能上也属于凸极式转子结构。从图 2-15 可以看出, d 轴主磁通穿过两个永磁体, 相当于在 d 轴磁通路径上存在两个额外的大气隙, 而 q 轴主磁通仅穿过铁心和气隙; 因空气的相对磁导率是 1, 所以 q 轴同步电感要明显大于 d 轴同步电感。通常用凸极率($P=L_q/L_d$)来表示永磁同步电机的凸极性。在相同条件下, 面装式转子结构的凸极性最小, 内埋式转子结构的凸极性最大。

2. 永磁同步电机的工作原理

永磁同步电机工作原理如图 2-16 所示。电机定子三相绕组接入三相对称交流电而产生旋转磁场, 故用旋转磁场 S、N 来模拟。根据磁极异性相吸、同性相斥的原理, 无论定子的旋转磁极与转子永磁体起始时相对位置如何, 定子的旋转磁极总会由于磁拉力而拖着转子同步旋转。

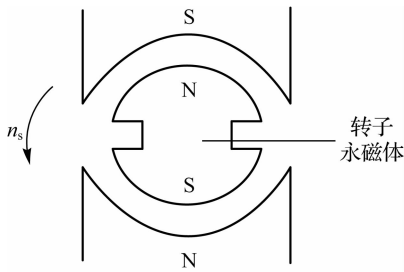


图 2-16 永磁同步电机模型

三、永磁无刷直流电机的结构与工作原理

区别于永磁同步电动机, 永磁无刷直流电机由直流电机发展而来, 用位置传感器和逆变器构成的电子换向器取代机械换向器, 把输入直流电流转换成交变的方波电流输入电枢绕组, 其转矩产生方式、运行性能、控制方法等接近于直流电机。

1. 永磁无刷直流电机的结构

永磁无刷直流电机是在传统直流电机基础上发展起来的, 其电磁结构和传统直流电机一样, 但是永磁无刷直流电机的电枢绕组放在定子上, 转子则是采用永磁材料制成的永磁体。永磁无刷直流电机以电子换向器取代了机械电刷和换向器, 消除了电机的滑动接触机构。

永磁无刷直流电机组成框图如图 2-17 所示。永磁无刷直流电机结构简单, 其结构示意图如图 2-18 所示。

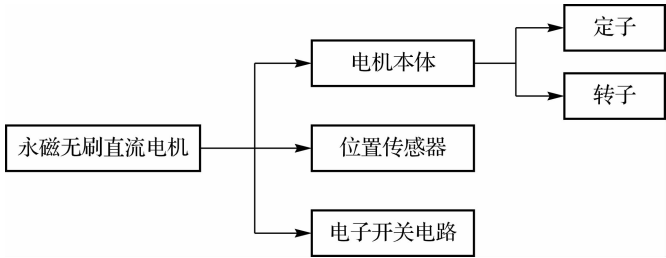


图 2-17 永磁无刷直流电机组成框图框图

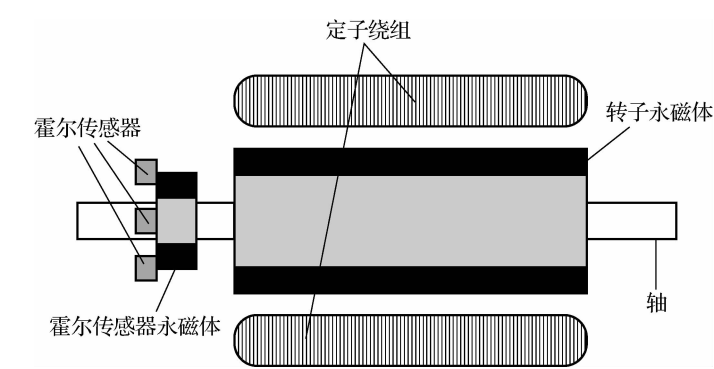


图 2-18 永磁无刷直流电机结构示意图

永磁无刷直流电机结构原理图如图 2-19 所示。从图中可以看出,直流电源经过开关电路向定子绕组进行供电,控制系统对位置传感器信号进行处理后实现对开关电路的控制,正确地判断各电机绕组的通电和断电状态,进而实现电机的换向。

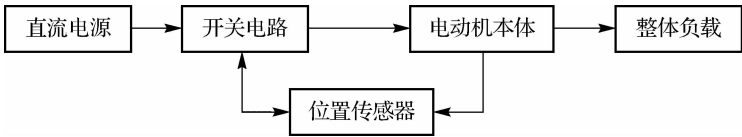


图 2-19 永磁无刷直流电机的结构原理图

2. 永磁无刷直流电机的工作原理

为消除电刷和机械换向器,在永磁无刷直流电机中将电机反装,即将永磁体磁极放在转子上,电枢绕组为定子绕组,为使定子绕组中电流方向能随其线圈边所处的磁场极性交替变化,需将定子绕组与逆变器连接,并安装转子位置传感器,检测转子磁极的空间位置,根据转子空间位置控制逆变器中功率开关器件的通断,从而控制电枢绕组的导通情况。转子位置传感器和逆变器起到“电子换向器”的作用。

以复制永磁无刷直流电机为例说明其工作原理。其电路原理如图 2-20 所示。

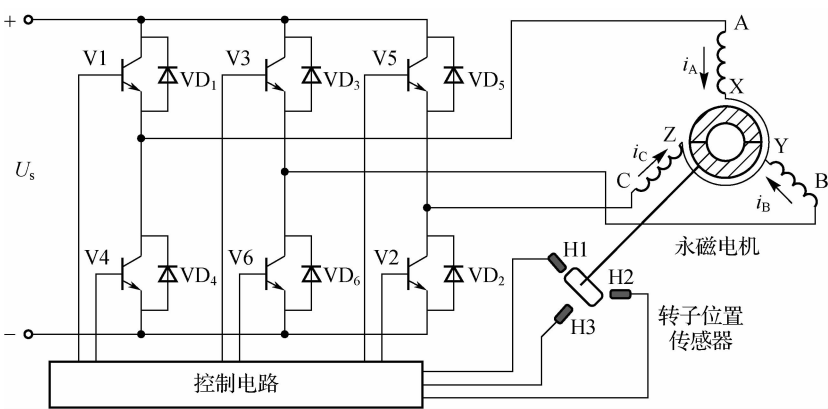


图 2-20 复制永磁无刷直流电机电路原理图



当转子永磁体转到图 2-21(a)所示位置时,转子位置传感器发出磁极位置信号,经过控制电路逻辑变换后驱动逆变器,使功率开关管 VD_1 、 VD_6 导通,电流 A 进 B 出,绕组 AB 通电。此时定子、转子磁场相互作用,拖动转子顺时针方向转动。此时电路为:电源 U_s 正极→功率开关管 VD_1 →A 相绕组→B 相绕组→功率开关管 VD_6 →电源 U_s 负极。

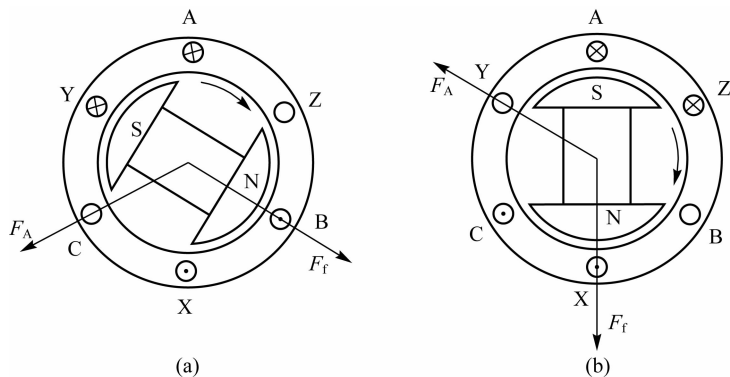


图 2-21 两相导通星形三相六状态永磁无刷直流电机工作原理示意图

当转子转过 60° 电角度,到达图 2-21(b)所示位置时,转子位置传感器输出的信号经过逻辑变换后使功率开关管 VD_6 截止、 VD_2 导通,此时功率开关管 VD_1 仍导通,绕组 AC 通电,电流 A 进 C 出,定子、转子磁场相互作用,使转子继续顺时针转动。此时电路为:电源 U_s 正极→功率开关管 VD_1 →A 相绕组→C 相绕组→功率开关管 VD_2 →电源 U_s 负极。

依此类推,每当转子沿顺时针方向转过 60° 电角度,就导通功率开关管进行一次换流,电机在 360° 电角度内有 6 个磁状态,每一状态都是两相导通,每相绕组中流过电流的时间相当于转子旋转 120° 电角度的时间,每个功率开关管的导通角为 120° 电角度。在 360° 电角度内,功率开关管的导通顺序依次为 $VD_1 VD_6 \rightarrow VD_1 VD_2 \rightarrow VD_2 VD_3 \rightarrow VD_3 VD_4 \rightarrow VD_4 VD_5 \rightarrow VD_5 VD_6$ 。定子绕组在控制电路的控制下,各相依次通电,实现了各相绕组电流的换相。



练习与思考

一、填空题

1. 永磁电机的分类方法很多,根据输入电动机接线端_____,其可分为永磁_____电动机和永磁_____电动机。
2. 同步电机属于_____电机,_____绕组与异步电机相同。它的_____旋转速度与_____绕组所产生的_____磁场的速度是_____的,因此被称为_____电机。
3. 永磁同步电机用_____取代绕线式同步电机转子中的_____绕组,从而省去了_____线圈、集电环和_____。
4. 永磁同步电机定子三相绕组接入_____电而产生旋转磁场,故用旋转磁场 S、N 来



模拟。根据磁极_____、_____的原理,无论定子旋转_____与永磁_____起始时相对位置如何,定子的_____磁极总会由于磁拉力_____同步旋转。

5. 永磁无刷直流电机,由_____电机发展而来,用_____和_____构成的电子换向器取代_____,把输入_____转换成_____电流输入电枢_____,其转矩_____,运行性能、_____等接近_____电机。

二、综合题

1. 绘制图 2-16,简述永磁同步电机的结构原理。
2. 绘制图 2-19,简述永磁无刷直流电机的结构原理。

任务四



异步电机

知识目标

- ➔ 了解异步电机的组成结构。
- ➔ 掌握异步电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 能认识异步电机的相关器件。
- ➔ 能读懂异步电机的主要参数。



学习内容

异步电机又称感应电机,是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩,从而实现电能转换为机械能的一种交流电机。

异步电机的种类很多。最常见的分类方法是按转子结构和定子绕组相数分类。按照转子结构来分,有鼠笼型异步电机和绕线型异步电机;按照定子绕组相数来分,有单相异步电机、两相异步电机和三相异步电机。

电动汽车主要使用鼠笼型异步电机。下面以鼠笼型三相异步电机(图 2-22)为例进行介绍。



图 2-22 鼠笼型三相异步电机外形

一、三相异步电机的结构

三相异步电机主要由静止的定子和旋转的转子两大部分组成,定子和转子之间存在气隙,此外还有端盖、轴承、机座和风扇等部件,其结构如图 2-23 所示。

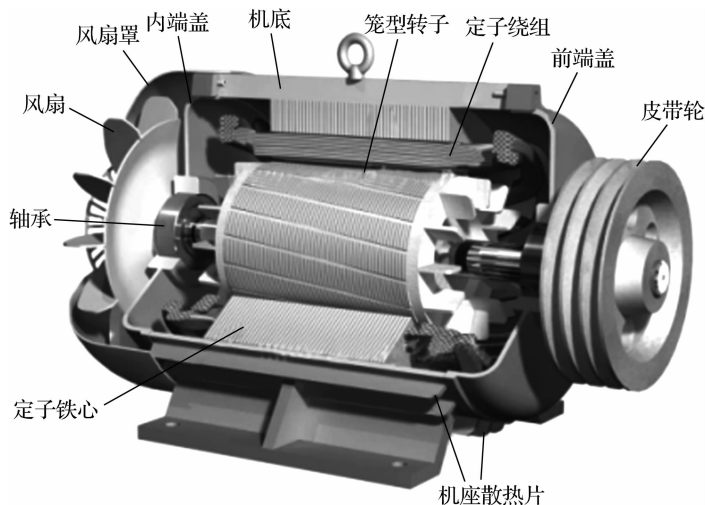


图 2-23 三相异步电机结构

三相异步电机主要部件拆分如图 2-24 所示。

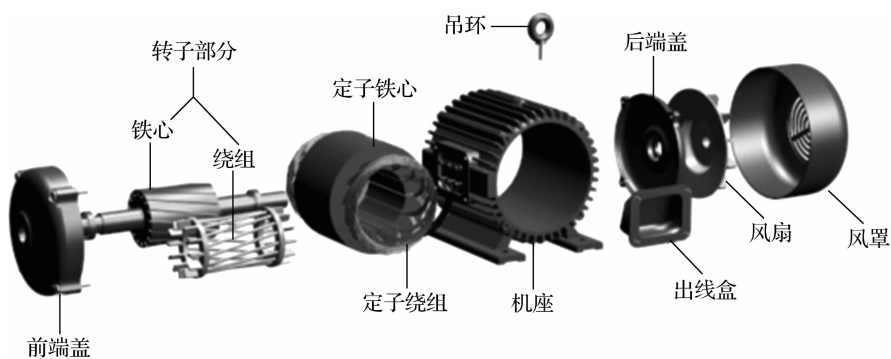


图 2-24 三相异步电机主要部件拆分

1. 定子

三相异步电机的定子由定子铁心、定子绕组和机座构成,如图 2-25 所示。

定子铁心是电机磁路的一部分,铁心的槽内嵌放着定子绕组。三个彼此独立的绕组组成三相绕组,一个绕组即为一相,每相在空间相差 120° 电角度。每个绕组均由若干线圈连接而成,线圈则由绝缘铜导线或绝缘铝导线绕制而成。

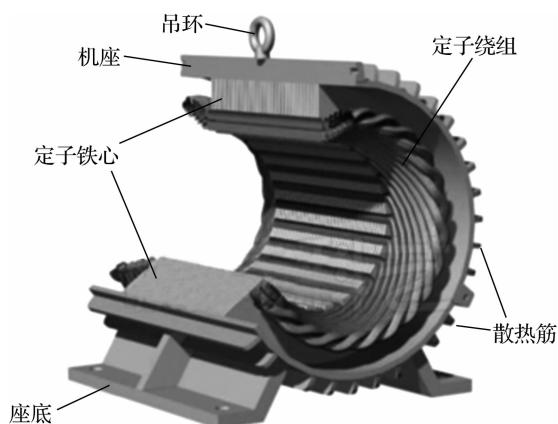


图 2-25 三相异步电机的定子

定子三相绕组是电机的电路部分,接入三相交流电源就可产生旋转磁场。定子三相绕组的 6 个出线端都引至接线盒上,首端分别标记为 U_1 、 V_1 、 W_1 ,末端分别标记为 U_2 、 V_2 、 W_2 。这 6 个出线端在接线盒里的排列如图 2-26 所示,可以接成星形或三角形。

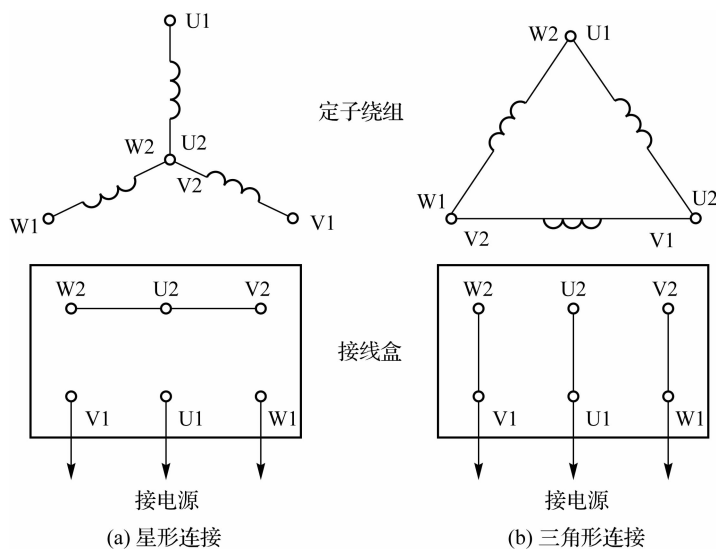


图 2-26 定子绕组的连接

2. 转子

转子是电机的旋转部分,由转子铁心、转子绕组和转轴组成,它可以带动机械负载旋转做功。

转子铁心是电机磁路的一部分,一般用 0.5 mm 厚、相互绝缘的硅钢片冲制叠压制成,硅钢片外圆冲有均匀分布的槽,用来安置转子绕组。转子冲片如图 2-27 所示。

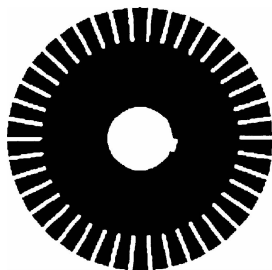


图 2-27 转子冲片

转子绕组的作用是产生感应电动势和电流,并在旋转磁场的作用下产生电磁力矩而使转子转动。转子绕组根据结构不同分为鼠笼型和绕线型两种。其构造虽然不同,但工作原理是一致的。图 2-28 所示为鼠笼型转子结构。

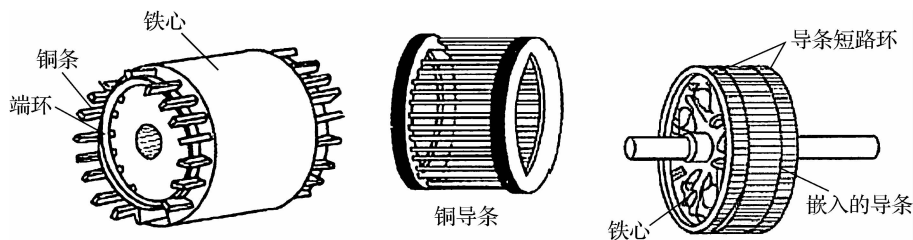


图 2-28 笼型铜条转子结构

转轴的作用主要是支承转子及传递转矩,并保证定子、转子之间存在均匀的气隙。气隙也是电机磁路的一部分,气隙越小,功率因数越高,空载电流越小。一般中小型电机的气隙为 0.2~1.5 mm。

二、三相异步电机的工作原理

1. 定子旋转磁场的产生

假设每相绕组只有一个线匝,分别嵌放在定子内圆周的 6 个凹槽之中。现将三相绕组的末端 X、Y、Z 相连,首端 A、B、C 接三相交流电源,且三相绕组分别命名为 A、B、C 相绕组,如图 2-29 所示。

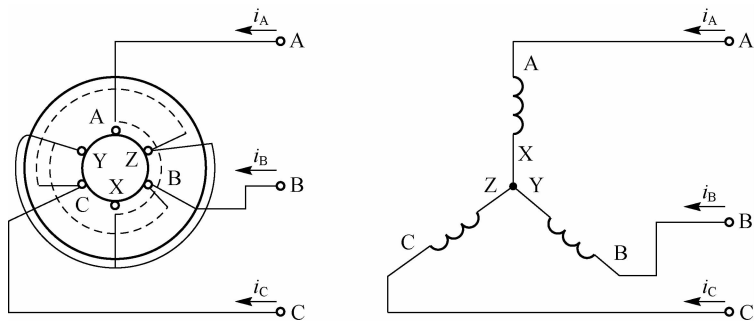


图 2-29 异步电机三相绕组星形连接



假设定子绕组中电流的正方向规定为从首端流向末端,且 A 相绕组的电流作为参考正弦量,即 i_A 的初相位为零,则三相绕组 A、B、C 的电流(相序为 A-B-C)瞬时值为:

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_C = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

图 2-30 所示为三相绕组电流随时间变化的曲线。

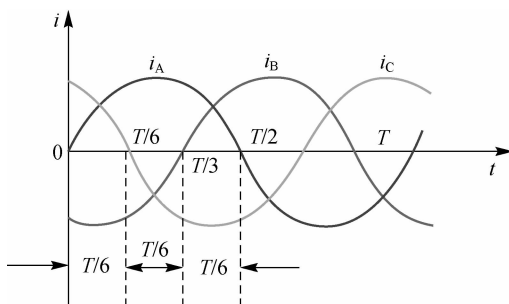


图 2-30 三相绕组电流随时间变化曲线

由图 2-30 可知:

(1) $t=0$ 时, $i_A=0$; i_B 为负, 电流实际方向与正方向相反, 即电流从 Y 端流到 B 端; i_C 为正, 电流实际方向与正方向一致, 即电流从 C 端流到 Z 端。按右手螺旋定则确定三相电流产生的合成磁场如图 2-31(a) 箭头所示。

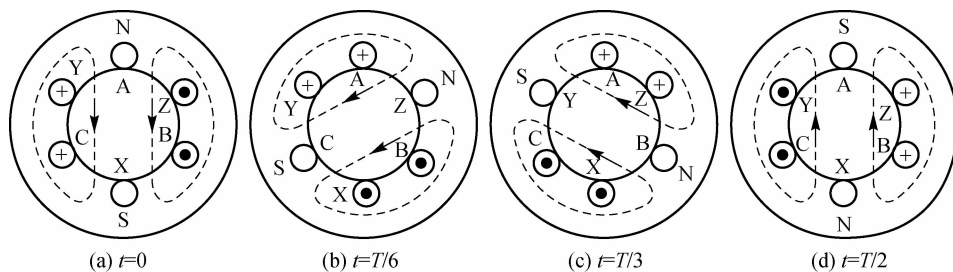


图 2-31 定子旋转磁场产生过程

(2) $t = T/6$ 时, i_A 为正, 电流实际方向与正方向一致, 即电流从 A 端流到 X 端; i_B 为负, 电流实际方向与正方向相反, 即电流从 Y 端流到 B 端; $i_C = 0$ 。此时的合成磁场如图 2-31(b) 箭头所示, 合成磁场已从 $t = 0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 $\pi/3$ 。

(3) $t = T/3$ 时, i_A 为正, 电流实际方向与正方向一致, 即电流从 A 端流到 X 端; $i_B = 0$; i_C 为负, 电流实际方向与正方向相反, 即电流从 Z 端流到 C 端。此时的合成磁场如图 2-31(c) 箭头所示。合成磁场已从 $t = 0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 $2\pi/3$ 。

(4) $t = T/2$ 时, $i_A = 0$; i_B 为正, 电流实际方向与正方向一致, 即电流从 B 端流到 Y 端; i_C 为负, 电流实际方向与正方向相反, 即电流从 Z 端流到 C 端。此时的合成磁场如图 2-31(d) 箭头所示。

箭头所示。合成磁场已从 $t = 0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 π 。

以上分析可以证明：当三相电流随时间不断变化时，合成磁场也在不断旋转，故称其为旋转磁场。

2. 旋转磁场的旋转方向

旋转磁场的旋转方向与通入绕组的电流相序是一致的，即旋转磁场的旋转方向与三相电流的相序一致。A 相绕组内的电流超前 B 相绕组内的电流 $2\pi/3$ ，而 B 相绕组内的电流又超前 C 相绕组内的电流 $2\pi/3$ ，即顺时针旋转。

如果将定子绕组接至三相电源的三根导线中的任意两根线对调，如将 B、C 两根导线对调，那么 B 相与 C 相绕组中电流的相位也将对调，如图 2-32 所示。

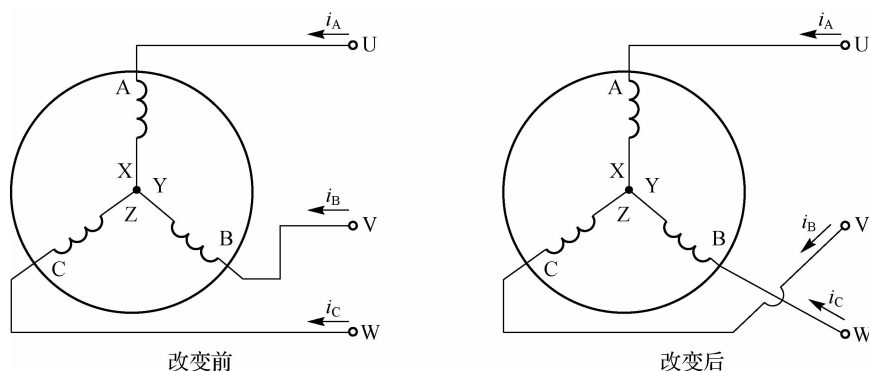


图 2-32 旋转磁场改变旋转方向时定子绕组的接线方法

B、C 两根导线对调后，此时 A 相绕组内的电流超前 C 相绕组内的电流 $2\pi/3$ ，而 C 相绕组内的电流又超前 B 相绕组内的电流 $2\pi/3$ 。在三相异步电机的实际应用中，若要改变电机的旋转方向，即正转或反转，只需将电源开关连接电机的三相导线中的任意两相对调即可，如图 2-33 所示。

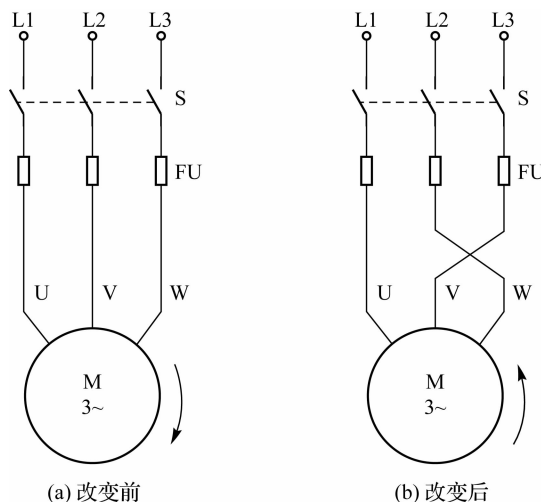


图 2-33 改变三相异步电机旋转方向的方法



三、三相异步电机的极数与转速

1. 极数

极数即磁极对数,用 P 表示。

三相异步电机的极数就是旋转磁场的极数。旋转磁场的极数和三相绕组的安排有关。

以 Y 型接法为例,每相绕组只有一个线圈,按图 2-34 所示放入定子槽内,当绕组的始端之间相差 120° 空间角时,合成的旋转磁场只有一对磁极,则磁极对数为 1,即 $P=1$ 。此时,电流变化一周,旋转磁场转一圈;电流每秒钟变化 50 周,旋转磁场转 50 圈;电流每分钟变化 (50×60) 周,旋转磁场转 3 000 圈。

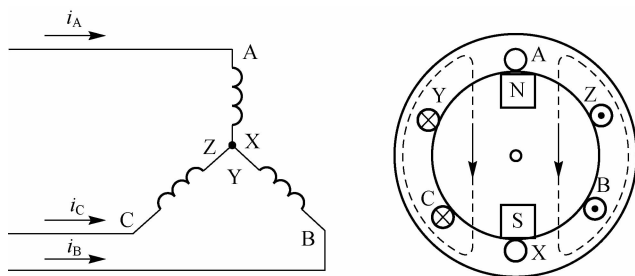


图 2-34 合成磁场只有一对磁极

仍以 Y 型接法为例,将每相绕组都改为两个线圈串联,按图 2-35 所示放入定子槽内,当绕组的始端之间相差 60° 空间角时,将形成两对磁极的旋转磁场,即 $P=2$ 。此时,电流变化一周,旋转磁场转半圈;电流每秒钟变化 50 周,旋转磁场转 25 圈;电流每分钟变化 (25×60) 周,旋转磁场转 1 500 圈。

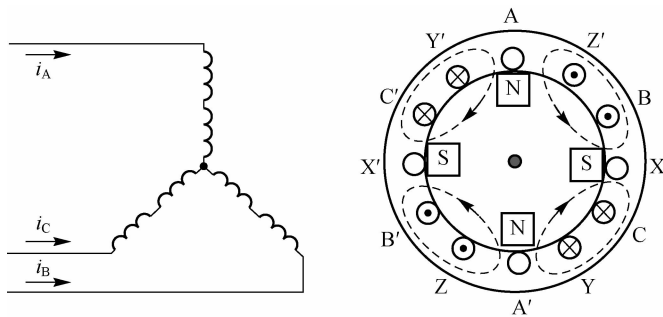


图 2-35 四极旋转磁场

同理,如果要求三对磁极,即产生 $P=3$ 的旋转磁场,那么每相绕组必须有均匀安排在空间的串联的三个线圈,绕组的始端之间相差 $40^\circ (120^\circ/P)$ 空间角。极数 P 与绕组的始端之间的空间角 θ 的关系为

$$\theta = \frac{120^\circ}{P}$$

2. 转速

三相异步电机的极数是指每相线圈在定子圆周内均匀分布的磁极数。磁极都是成对出现 N 极和 S 极,因此电机有二、四、六、八……极之分。电机的极数越多,转速越低;极数越少,转速越高。

电机同步转速=60×电源频率/磁极对数。用公式表示为:

$$n=60f/P$$

其中, f 为电源频率, n 为电机同步转速。

在中国,电源频率为 50 Hz,因此二极电机的同步转速为 3 000 r/min,四极电机的同步转速为 1 500 r/min。以此类推,极对数与电机同步转速的关系见表 2-2。

表 2-2 磁极对数与电机同步转速的关系

$(f=50\text{ Hz})$					
磁极对数 P	1	2	3	4	5
$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000	1 500	1 000	750	600

而异步电机转子的转速总是低于或高于其旋转磁场的转速,异步之名由此而来。异步电机转子转速与旋转磁场转速之差(称为转差)通常在 10%以内,一般为 4%,故异步电机实际转速略低于磁场同步转速,二极的一般为 2 960 r/min,四极的一般为 1 450 r/min,六极的一般为 960 r/min,八极的一般为 740 r/min。

四、三相异步电机的主要技术参数

(1)功率。功率指额定功率,表示电机在额定电压下的转轴输出功率。

(2)电压。电压指额定电压,表示电机正常工作时加在定子绕组线端的电压。按规定,三相异步电机额定电压等级有 220 V、380 V、3 000 V、6 000 V 等。

(3)电流。电流指额定电流,表示电机在额定工作状态下运行时,流过定子绕组的线电流。

(4)频率。频率指额定频率,表示电机允许接入的交流电源频率。

(5)接法。接法指电机定子绕组的连接方式,通常有“Y”和“△”两种接法。

(6)工作方式。工作方式表示电动机工作特征,可分为连续、短时、断续三种。其中,短时是指电机只能在规定时间内运行,规定时间分为 10 min、30 min、60 min、90 min 四种。运行完后必须待电机冷却后才能再次运行。断续是指电机只能间歇工作,间歇工作时间通常为一个周期(如 10min)的 15%、28%、40%、60%等,其余为停机时间。

(7)功率因数。功率因数指电机在额定工作状态下运行时输出的有功功率与输入视在功率的百分比。

(8)绝缘等级。绝缘等级指在正常状态下工作时,电机绕组允许超出环境温度值的温升等级。通常分为七个等级,各级允许温升(℃):Y 级 90,A 级 105,E 级 120,B 级 130,F 级 155,H 级 180,C 级 180 以上。



(9)额定转速。额定转速指电机在额定工作条件下转子每分钟转数,单位 r/min。



练习与思考

一、填空题

1. 异步电机又称_____电机,是由气隙旋转_____与_____绕组感应电流相互作用产生_____,从而实现_____转换为_____的一种交流电机。
2. 异步电机按转子结构来分,有_____异步电机和_____异步电机;按定子绕组相数来分,有_____异步电机、_____异步电机和_____异步电机。电动汽车主要使用_____异步电机。
3. 三相异步电机主要由_____的_____和_____的_____两大部分组成,_____和_____之间存在气隙,此外,还有端盖、_____,机座和_____等部件。
4. 三相异步电机的定子由定子_____、定子_____和_____构成,_____铁心是电机_____的一部分,是电机的_____部分,接入_____就可产生_____。
5. 三相异步电机的转子_____是电机_____的一部分,转子是电机的_____部分,由转子_____,转子_____和转轴组成,它可以带动机械负载_____。
6. 转子绕组的作用是_____和电流,并在旋转_____的作用下产生_____而使转子_____。

二、简答题

1. 简述定子旋转磁场的产生原理。
2. 简述如何改变旋转磁场的旋转方向。
3. 简述三相异步电机的工作原理。
4. 简述三相异步电机的极数与转速的关系。

任务五



开关磁阻电机

知识目标

- ➔ 了解开关磁阻电机的组成结构。
- ➔ 掌握开关磁阻电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 能认识开关磁阻电机相关器件。



学习内容

继变频调速系统、直流电机调速系统之后最具优势的新一代无级调速系统是开关磁阻电机调速系统。其效率高,启动电流小,启动转矩大,制动性能好,能实现再生制动,四象限控制灵活,节约电能效果显著,系统调控性能好,结构简单坚固,调速范围宽,性能卓越,功能强大,越来越被市场推崇和广泛使用,在电动汽车驱动、通用工业、工程机械、家用电器、航空电气、传动设备和纺织机械等领域优势显著。

图 2-36 所示为开关磁阻电机。

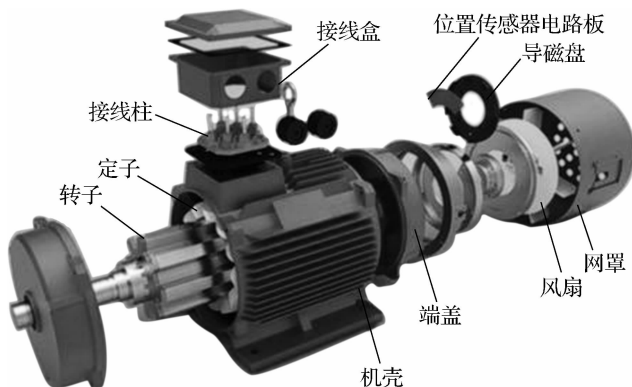


图 2-36 开关磁阻电机



一、开关磁阻电机的结构

与普通电机一样,开关磁阻电机的转子与定子之间有很小的缝隙,转子可在定子内自由转动。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。

定子中有多个绕组,采取一定的接线方式,与定子铁心一起形成多个磁极。磁极是偶数的,两个互差 180° 角的绕组组成一个磁极对,分别代表磁场的 N、S 极。定子铁心有 6 个磁极,由导磁良好的硅钢片冲制后叠成,如图 2-37 所示。

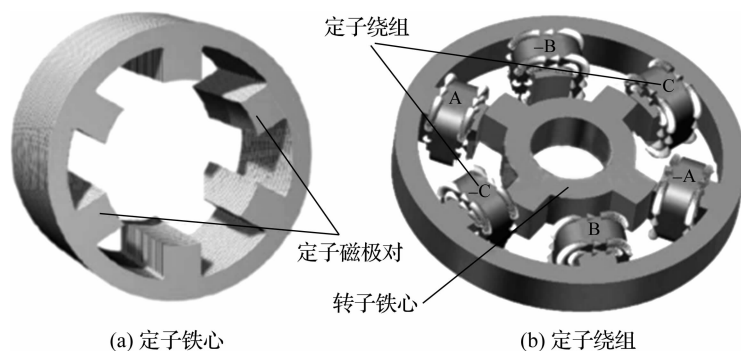


图 2-37 磁阻电机定子铁心结构

开关磁阻电机的转子由转子轴和转子铁心组成,其上无绕组也无导条。转子铁心由导磁良好的硅钢片叠制而成,有多个(偶数的)突出极,可为定子磁场提供顺畅的磁路,如图 2-38 所示。

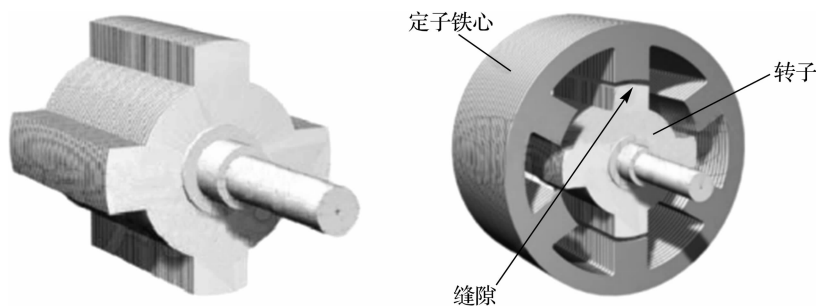


图 2-38 磁阻电机转子结构

由于开关磁阻电机的定子和转子的磁极具有双凸极结构,因而定子和转子的极数有许多组合,通常采用四相 8/6 极、三相 6/4 极结构方式,如图 2-39 所示。

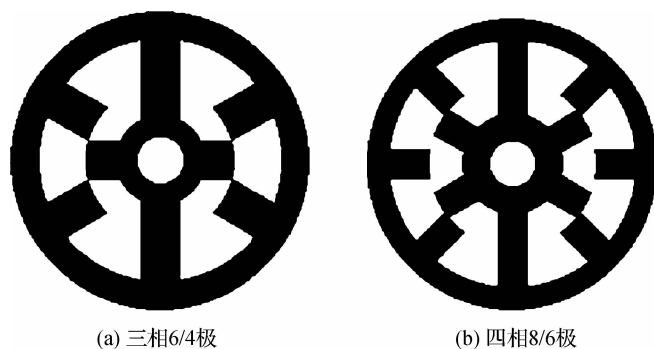


图 2-39 磁阻电机定子和转子结构方式的不同组合

二、开关磁阻电机的工作原理

双凸极结构开关磁阻电机的转子仅由硅钢片叠压而成,既无绕组又无永磁体;定子各极上有集中绕组,径向相对极的绕组串联,构成一相。

图 2-40 所示为四相 8/6 极开关磁阻电机典型结构原理图。以图示定子、转子所处的相对位置为起始位置,若依次给 D-A-B-C 相绕组通电,则转子会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转;反之,若依次给 B-A-D-C 相通电,则电机将沿顺时针方向转动。可见,开关磁阻电机的转向与相绕组的电流方向无关,而仅取决于相绕组通电的顺序。

另外,当定子 D1-D2 极励磁时,所产生的磁力力图使转子旋转到转子极轴线与定子极轴线 D1-D2 重合的位置,并使 D 相励磁绕组的电感最大。

当开关 S1、S2 导通时,A 相绕组从直流电源 U 吸收电能;当开关 S1、S2 关断时,绕组中电流通过续流二极管 VD1、VD2 将剩余的能量回馈给电源。因此,开关磁阻电机传动的共性特点是具有再生作用,系统效率高。

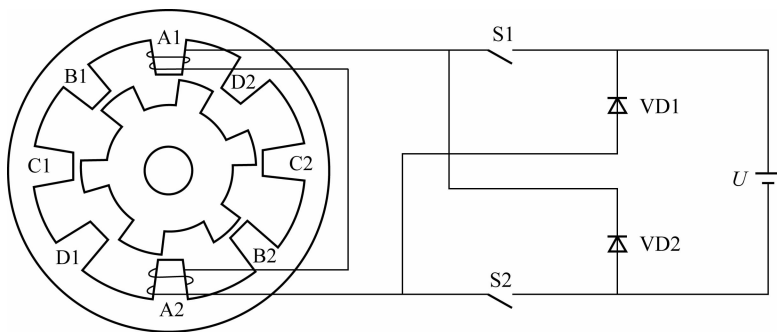


图 2-40 四相 8/6 极开关磁阻电机典型结构原理图(只画出其中一相)

以三相 6/4 极开关磁阻电机为例来说明转子的工作原理。图 2-41 所示为开关磁阻电机励磁绕组分布图,定子 6 个磁极上绕有线圈,径向相对的两个线圈连接在一起,组成一相,该电机有 3 相,结合定子与转子的极数,就称该电机为三相 6/4 极结构。

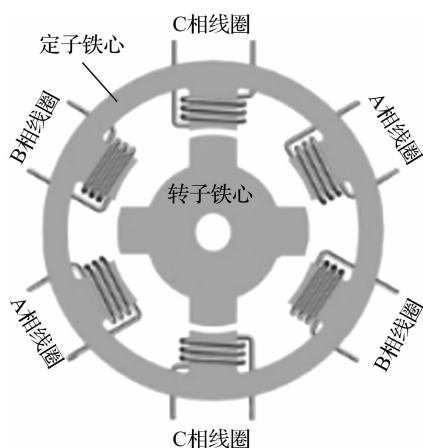


图 2-41 开关磁阻电机励磁绕组分布图



注意

图 2-41 中标注的 A 相、B 相、C 相线圈仅为后面分析磁路带来方便，并不是连接普通的三相交流电。

图 2-42 所示为该开关磁阻电机工作原理图，A 相、B 相、C 相线圈由开关控制电流通断，通过定子与转子的是磁力线(可将其看成极有弹力的线，磁力线间有磁力作用)，约定转子启动前的转角为 0° 。从中可以看到开关磁阻电机是如何转动起来的：如图 2-42(a)所示，A 相线圈接通电源产生磁通，磁力线从最近的转子磁极通过转子铁心，磁力牵引转子开始逆时针转动；磁力牵引转子转到 10° ，如图 2-42(b)所示；磁力牵引转子转到 20° ，如图 2-42(c)所示。磁力一直牵引转子转到 30° 为止。转到 30° 后转子不再转动，此时磁路最短。

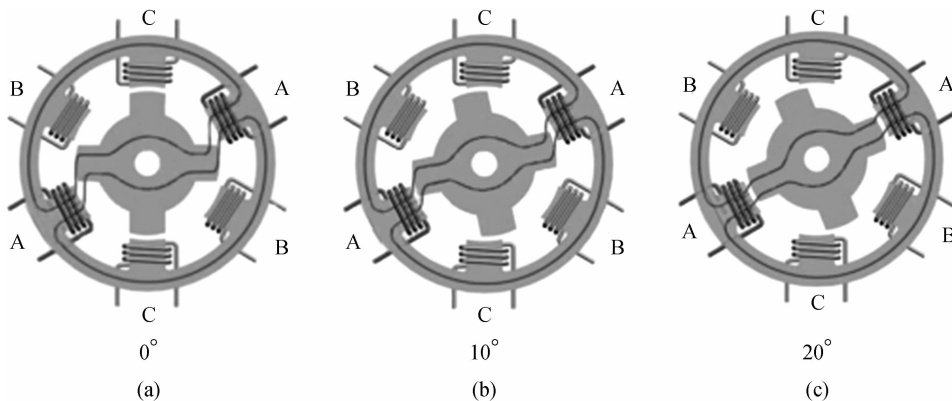


图 2-42 开关磁阻电机工作原理图(1)

为了使转子继续转动，在转子转到 30° 前切断 A 相电源，在转子转到 30° 时接通 B 相电源，磁通即从最近的转子磁极通过转子铁心，如图 2-43(a)所示。转子继续转动，图 2-43(b)所示为转子转到 40° ，图 2-43(c)所示为转子转到 50° ，磁力一直牵引转子转到 60° 为止。

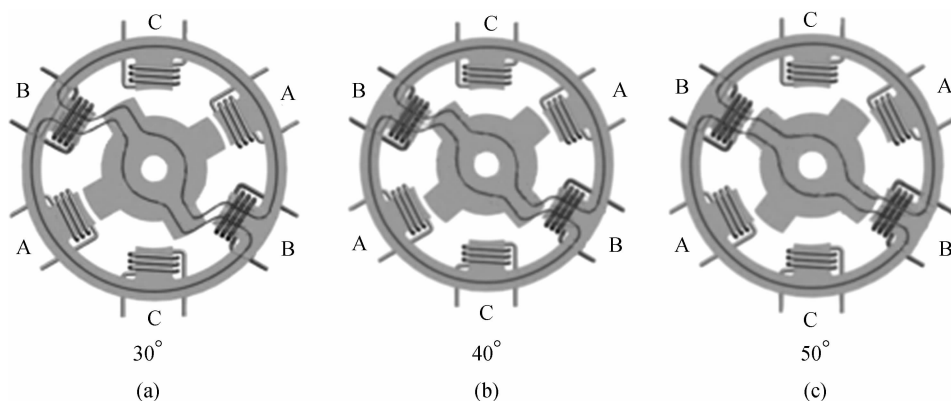


图 2-43 开关磁阻电机工作原理图(2)

在转子转到 60° 前切断 B 相电源,在转子转到 60° 时接通 C 相电源,磁通从最近的转子磁极通过转子铁心,如图 2-44(a) 所示。转子继续转动,图 2-44(b) 所示为转子转到 70° ,图 2-44(c) 所示为转子转到 80° ,磁力一直牵引转子转到 90° 为止。

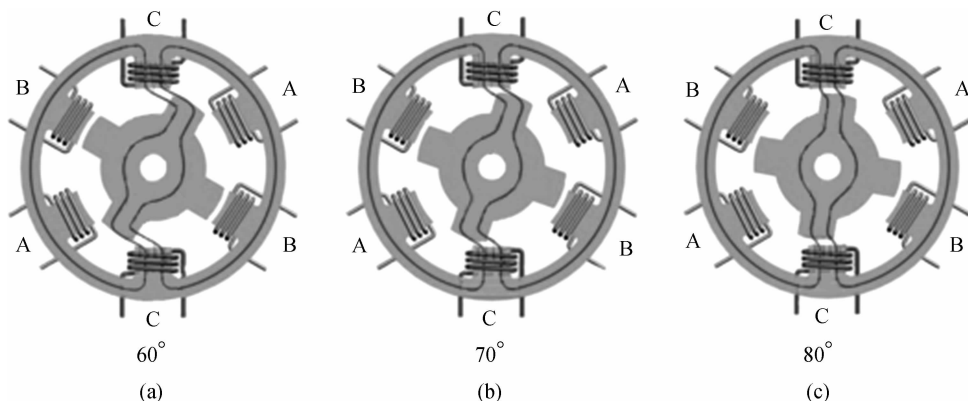


图 2-44 开关磁阻电机工作原理图(3)

在转子转到 90° 前切断 C 相电源。转子在 90° 的状态与在 0° 时一样,重复前面过程,接通 A 相电源,转子继续转动。这样不停地重复下去,转子就会不停地旋转。这就是开关磁阻电机的工作原理。

该电机工作利用了磁阻最小原理,故称之为磁阻电机;又因为电机磁场并非由正弦波交流电产生,其线圈电流通断、磁通状态直接受开关控制,故称之为开关磁阻电机。

三、开关磁阻电机的优缺点

1. 开关磁阻电机的优点

开关磁阻电机具有以下优点:

(1)结构简单、成本低,可用于高速运转工况。开关磁阻电机的结构比鼠笼型感应电机还要简单。其突出的优点是转子上没有任何形式的绕组,因此不会有鼠笼型感应电机制造

过程中铸造不良和使用过程中断条等问题。其转子机械强度极高,可以用于超高速运转工况(如每分钟上万转)。在定子方面,它只有几个集中绕组,因此制造简便,绝缘结构简单。

(2)功率电路简单、可靠。因为开关磁阻电机转矩方向与绕组电流方向无关,即只需单方向绕组电流,故功率电路可以做到每相一个功率开关。对比异步电机绕组需流过双向电流,向其供电的 PWM 变频器功率电路每相需两个功率器件。因此,开关磁阻电机调速系统较 PWM 变频器功率电路中所需的功率元件少,电路结构简单。

另外, PWM 变频器功率电路中每桥臂两个功率开关管直接跨在直流电源侧,易发生直通短路故障,烧毁功率器件。而开关磁阻电机调速系统中每个功率开关器件均直接与电机绕组相串联,从根本上避免了直通短路现象。因此开关磁阻电机调速系统中功率电路的保护电路可以简化,既降低了成本,又有较高的工作可靠性。

(3)系统可靠性高。从电磁结构上看,开关磁阻电机各相绕组和磁路相互独立,各自在一定轴角范围内产生电磁转矩,而不像一般电机中那样必须在各相绕组和磁路共同作用下才产生一个旋转磁场,电机才能正常运转。从控制结构上看,开关磁阻电机各相电路各自给一相绕组供电,一般也是相互独立工作的。由此可知,当电机一相绕组或控制器一相电路发生故障时,只需停止该相工作,电动机除总输出功率能力有所减小外,并无其他妨碍。

(4)启动转矩大,启动电流低。控制器从电源侧吸收较少的电流,在电机侧得到较大的启动转矩是开关磁阻电机调速系统的一大特点。典型产品的数据是:启动电流为 15% 的额定电流时,启动转矩为 100% 的额定转矩;启动电流为 30% 的额定电流时,启动转矩可达 250% 的额定转矩。而其他调速系统的启动特性与之相比则较差,如直流电机需要 100% 的额定电流,鼠笼型感应电机需要 300% 的额定电流,才能获得 100% 的额定转矩。开关磁阻电机启动电流小而转矩大的优点还可以延伸到低速运行阶段,因此它十分适合那些需要重载启动和较长时间低速重载运行的机械。

(5)适于频繁起停及正反向转换运行。开关磁阻电机调速系统具有的高启动转矩、低启动电流的特点,使其在启动过程中电流冲击小,电机和控制器发热较连续额定运行时还要小。可控参数多,使其制动运行能与电动运行具有同样优良的转矩输出能力和工作特性。两者综合作用的结果必然使之适于频繁起停及正反向转换运行,频率可达 1 000 次/小时。

(6)可控参数多,调速性能好。开关磁阻电机可控的运行参数有相导通角、相关断角、相电流幅值、相绕组电压。可控参数多,意味着控制灵活方便。可以根据运行要求和电机工况,采取不同的控制方法,使其运行于最佳状态(如出力最大、效率最高等),还可实现各种不同的功能曲线,如使电机具有完全相同的四象限运行能力,并具有最高启动转矩和串励电机的负载能力曲线。由于开关磁阻电机速度闭环是必备的,因而开关磁阻电机调速系统具有很高的稳速精度,可以很方便地构成无静差调速系统。

(7)效率高,损耗小。开关磁阻电机调速系统是一种非常高效的调速系统。这是因为一方面电机绕组无铜损;另一方面电机可控参数多,灵活方便,易于在宽转速范围和不同负载下实现高效优化控制。

(8)可通过机和电的统一协调设计满足各种特殊使用要求。



2. 开关磁阻电机的缺点

开关磁阻电机的特殊结构和工作方式也引起如下一些缺点。

(1)有转矩脉动。从工作原理可知,开关磁阻电机转子上产生的转矩是由一系列脉冲转矩叠加而成的,由于双凸极结构和磁路饱和非线性的影响,合成转矩不是一个恒定转矩,而有一定的谐波分量,这影响了开关磁阻电机低速运行性能。

(2)开关磁阻电机传动系统的噪声与振动比一般电机大。

(3)开关磁阻电机的出线头较多,如三相开关磁阻电机至少有4根出线头,四相开关磁阻电机至少有5根出线头,此外还有位置传感器出线端。

上述缺点通过对电动汽车电机进行精心设计,采取适当措施,并从控制角度考虑采用合理策略可以得到改进。



练习与思考

一、填空题

1. 开关磁阻电机的定子由_____的_____冲制后叠成,在定子的_____上装有集中_____,径向相对的两个_____构成一相,向电机提供工作_____的励磁绕组。
2. 开关磁阻电机的转子由_____的_____叠制而成,其上没有_____;与普通电机一样,转子与定子之间有很小_____,转子可在定子内自由_____。
3. 在转子上没有_____,这是开关磁阻电机的主要_____.它是利用_____原理,也就是磁通总是沿_____的路径闭合,利用齿极间的_____拉动转子_____。
4. 开关磁阻电机的_____与_____的电流方向_____,而仅取决于_____通电的_____。

二、简答题

简述开关磁阻电机与其他电机相比的优缺点。

三、综合题

绘制图 2-40,简述开关磁阻电机的工作原理。

任务六



轮毂电机

知识目标

- ➔ 了解轮毂电机的组成结构。
- ➔ 掌握轮毂电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 会区别轮毂电机和轮边电机。
- ➔ 能认识轮毂电机相关器件。



学习内容

轮毂电机技术又称车轮内装电机技术,它最大的特点就是将动力、传动和制动等装置都整合到轮毂内,将电动汽车的机械部分大大简化了。

图 2-45 所示为较为典型的轮毂电机示意图。



图 2-45 较为典型的轮毂电机示意图

一、轮毂电机的类型

1. 按轮毂电机的结构分类

轮毂电机根据转子形式主要分为外转子型和内转子型两类。

1) 外转子型轮毂电机

外转子型轮毂电机采用低速外转子电机,电机的转速可达 1 000~1 500 r/min,无任何减速装置,电机的外转子与车轮的轮辋固定或集成在一起,车轮的转速与电机相同。

图 2-46 所示为外转子型轮毂电机结构示意图。

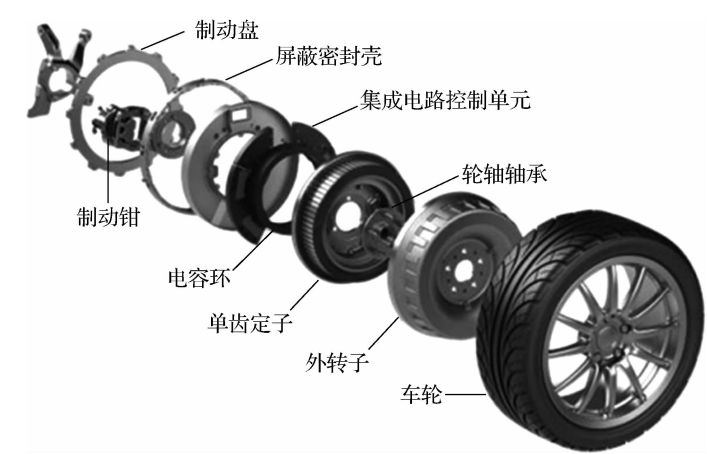


图 2-46 外转子型轮毂电机结构示意图

低速外转子电机结构简单、轴向尺寸小、比功率高,能在很宽的速度范围内控制转矩,且响应速度快,外转子直接和车轮相连,没有减速机构,因此效率高;缺点是如要获得较大的转矩,就必须增大电机的体积和质量,因此成本高,加速时效率低,噪声大。

2) 内转子型轮毂电机

内转子型轮毂电机采用高速内转子电机,同时装备固定传动比的减速器。为了获得较高的功率密度,电机的转速通常高达 10 000 r/min。减速结构通常采用传动比为 10 : 1 左右的行星齿轮减速装置,车轮的转速在 1 000 r/min 左右。

图 2-47 所示为内转子型轮毂电机结构示意图。

高速内转子电机具有较高的比功率,质量小,体积小,效率高,噪声小,成本低;缺点是必须采用减速装置,使效率降低,非簧载质量增大,电机的最高转速受线圈损耗、摩擦损耗以及变速机构的承受能力等因素的限制。

这两种结构在目前的电动汽车中都有应用,但是随着紧凑的行星齿轮变速机构的出现,高速内转子式轮毂电机在功率密度方面比低速外转子式轮毂电机更具竞争力。

2. 按轮毂电机的电机分类

轮毂电机按电机类型又可分为永磁式、感应式、开关磁阻式。

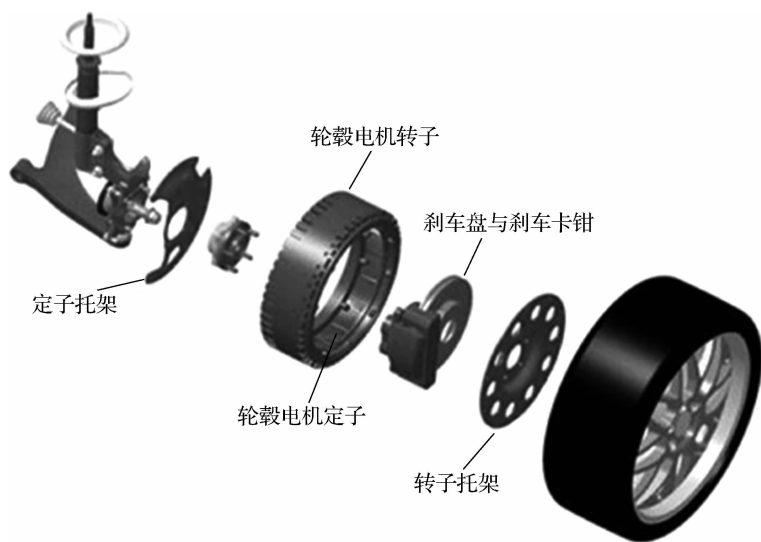


图 2-47 内转子型轮毂电机结构示意图

(1) 永磁无刷同步电机。永磁无刷同步电机可采用圆柱形径向磁场结构或盘式轴向磁场结构,具有较高的功率密度和效率以及宽广的调速范围,发展前景十分广阔,已在国内外多种电动汽车中获得应用。

(2) 交流感应异步电机。交流感应异步电机结构简单、坚固耐用、成本低、运行可靠,转矩脉动小,噪声低,不需要位置传感器,转速极限高;缺点是驱动电路复杂,成本高,相对永磁式电机而言,异步电机效率和功率密度偏低。

(3) 开关磁阻式电机。开关磁阻式电机具有结构简单,制造成本低,转速、转矩特性好等特点,适用于电动汽车驱动;缺点是设计和控制非常困难,运行噪声大。

二、轮毂电机的工作原理

随着更为紧凑的行星齿轮减速器的出现,内转子式轮毂电机在功率密度方面比低速外转子式更具竞争力。图 2-48 所示为米其林公司研制的电动汽车电动轮,集成了嵌入式主动悬架、驱动电机、悬挂电机及盘式制动器。



图 2-48 米其林电动汽车电动轮

内转子式轮毂电机的工作原理如图 2-49 所示。

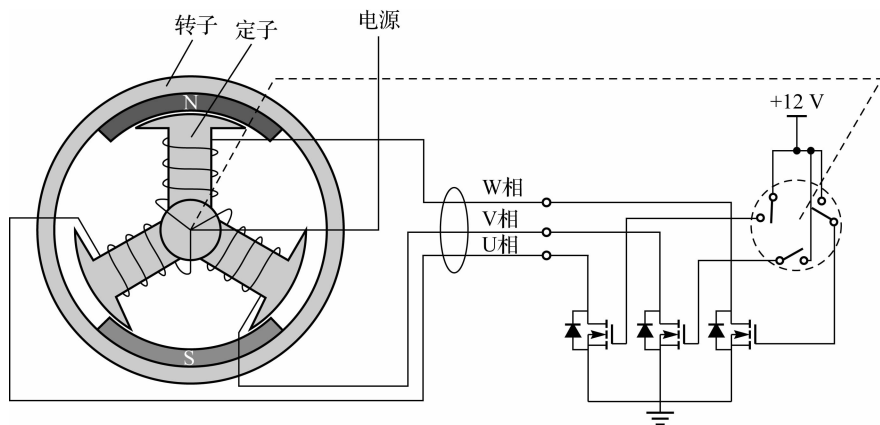


图 2-49 内转子式轮毂电机的工作原理

电机直接测量电机反电动势从而知道转子的位置，由控制器驱动功率管进行换相。虽然存储器能记录定子和转子的相对位置，但对于极缓慢的转动，系统将无法理解电机绕组反电动势的波形。

当电机达到一定转速时，由于受惯性限制波峰波谷都代表一定的角度，刹车时就关闭电机。因此使用磁传感器的轮毂电机是主流。

图 2-49 中红色磁钢(N)转子处在死角位置，要靠蓝色磁钢(S)转子上方的绕组通电，走出死角。

图 2-50 所示电机就没有死角，只要知道转子位置，就知道怎样驱动功率管。

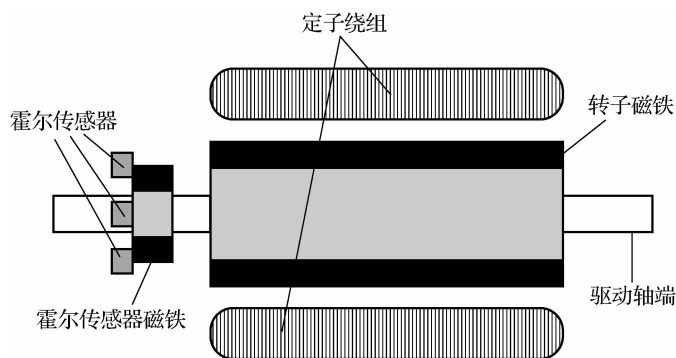


图 2-50 霍尔传感器检测原理

控制器读取霍尔信号判断电机转子所在扇区，决定逆变桥桥臂的开关逻辑。方波控制实质上是比较简单的六步换向操作，任意时刻都存在一相定子绕组处于正向导通，即相电流正向流出；第二相定子绕组内反相导通，即相电流反向流入；第三相定子绕组不通电。

电磁力矩来源于定子绕组产生磁场吸引着转子磁场不断转动，若忽略磁阻转矩（表贴式永磁同步电机），定子绕组产生的交轴磁场产生了全部的电磁力矩；相反，定子的直轴磁场对转子磁钢的相互作用，产生的电磁转矩为零。所以，需要不停地改变定子磁场的位置，来驱



动转子磁钢的不断转动,控制定子磁场总是领先于转子磁场一定角度,从而形成了永磁体的磁场总是在追赶绕组合成磁场。

具体控制流程如图 2-51 所示。

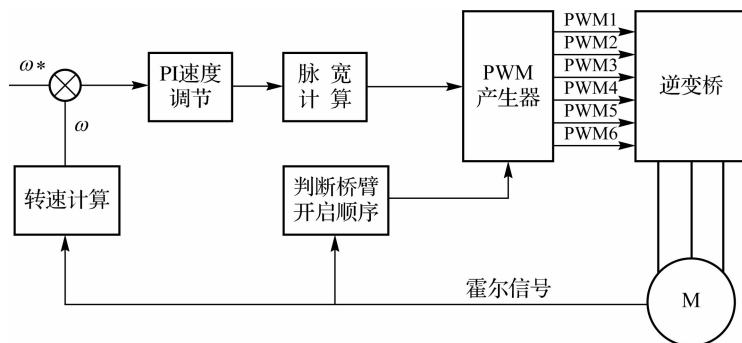


图 2-51 方波控制逻辑框图

控制器检测转子磁场所在的扇区,然后控制绕组产生指向下一个扇区的磁场,控制转子转动一周只需改变定子绕组六次即可。所以每完成一个通电周期意味着转子仅仅是转动了电角度一圈,并未实现转子转动机械角度一周,所以转子转动机械角度一周需要的换向周期数和极对数相同。

这种控制主要实现电机的转速控制。通过读取霍尔传感器的位置信号,判断转子位置,同时电机转速控制器对电机的转速做闭环控制,由于电压与转速成正比,控制输出的相电压即可实现转速控制。这种控制方法通过简单的六步换向改变电枢磁场,引领转子转动,在任意时刻仅有两相绕组导通。

方波控制采用霍尔元件作为位置传感器。3 个霍尔元件分别安置在电角度为 0° 、 120° 和 240° 的位置,如图 2-52 所示,将 360° 电角度分割成 6 个扇区。控制器检测转子所在扇区,控制电枢磁场指引转子转向下一个扇区。

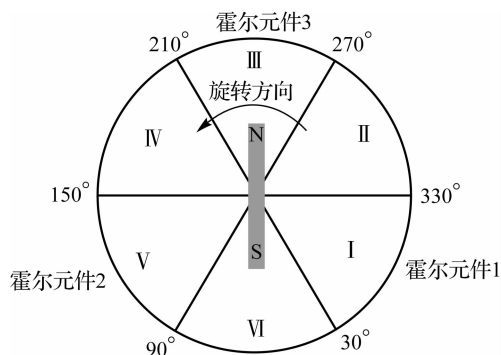


图 2-52 扇区示意图

三、轮毂电机的驱动方式

轮毂电机的驱动方式主要分为减速驱动式和直接驱动方式。

1. 减速驱动方式

电动汽车电机一般在高速下运行,减速驱动方式下选用高速内转子式电机。减速机构放置在电机和车轮之间,起到减速和增加转矩的作用。减速驱动方式适合在丘陵或山区使用,以及要求过载能力大和城区客车等需要频繁启停场合。

减速驱动的优点有:电机运行在高速下,具有较高的效率,转矩大,爬坡性能好,能保证汽车在低速运行时获得较大的平稳转矩。

其缺点是:难以实现液态润滑,齿轮磨损严重,使用寿命短,不易散热,噪声大。

2. 直接驱动方式

直接驱动方式下,轮毂电机则采用外转子结构,由于省去了机械机构部分,因而其动态响应迅速,同时效率进一步提升。为了使电动汽车能够顺利起步,要求电机在低速时能提供大的转矩。直接驱动方式适合平路或负荷较小的场合。

直接驱动的优点:不需要减速机构,使得整个驱动结构更加简单、紧凑,轴向尺寸也较小,而且效率也进一步提高,响应速度也较快。

直流驱动的缺点:起步、爬坡以及承载较大载荷时需要大电流,易损坏电池,电机效率峰值区域小。

轮毂电机的驱动方式比较见表 2-3。

表 2-3 轮毂电机的驱动方式比较

特 点	减速驱动方式轮毂电机	直接驱动驱动方式轮毂电机
结构	内转子	外转子
减速机构	有	无
维修费用	高	低
成本	低	高
寿命	短	较长
尺寸和质量	小	大
适用场合	过载能力大	负载较轻

四、轮毂电机的优缺点

1. 轮毂电机的优点

(1)省略大量传动部件,让车辆结构更为简单。对于传统车辆来说,离合器、变速器、传动轴、差速器以及分动器都是必不可少的,这些部件不仅质量而使车辆结构更为复杂,而且存在需要定期维护和增大故障率的问题。轮毂电机就很好地解决了这个问题。除了结构



更为简单之外,采用轮毂电机驱动的车辆可以获得更好的空间利用率,同时传动效率也比传统车辆高出不少。

(2)可实现多种复杂的驱动方式。轮毂电机具备单个车轮独立驱动的特性,因此无论是前驱、后驱还是四驱形式,它都可以比较轻松地实现。全时四驱在轮毂电机驱动的车辆上实现起来非常容易。同时轮毂电机可以通过左右车轮的不同转速甚至反转实现类似履带式车辆的差动转向,大大减小车辆的转弯半径,在特殊情况下几乎可以实现原地转向(不过此时对车辆转向机构和轮胎的磨损较大),对于特种车辆很有价值。

(3)便于采用多种新能源车技术。新能源汽车不少都采用电驱动,因此轮毂电机也就派上了大用场。无论是纯电动汽车、燃料电池电动汽车,还是增程电动汽车,都可以用轮毂电机作为主要驱动装置;即便是混合动力车型,也可以采用轮毂电机作为起步或急加速时的助力,可谓是一机多用。同时,新能源车的很多技术,如制动能量回收(即再生制动)也可以很轻松地在轮毂电机驱动车型上实现。

2. 轮毂电机的缺点

(1)增大簧下质量和轮毂的转动惯量,对车辆的操控有所影响。普通民用车辆常常用一些相对轻质的材料如铝合金来制作悬挂的部件,以减轻簧下质量,提升悬挂的响应速度。但轮毂电机较大幅度地增大了簧下质量,同时也增加了轮毂的转动惯量,这对于车辆的操控性能是不利的。不过考虑到电动汽车目前大多限于代步而非追求动力性能,这一点尚不是最大缺陷。图 2-53 所示为轮毂电机与悬架部分。



图 2-53 轮毂电机与悬架部分

(2)电制动性能有限。维持制动系统运行需要消耗不少能量。现在的传统动力车辆已经有不少装备了利用涡流制动原理(即电阻制动)的辅助减速设备,如很多卡车所用的电动缓速器。而因为能源的关系,电动汽车采用电制动是首选。对于轮毂电机驱动的车辆,轮毂电机系统的电制动容量较小,不能满足整车制动性能的要求,需要附加机械制动系统;对于普通电动汽车,因为没有传统内燃机带动的真空泵,所以需要电动真空泵来提供制动助力,这也意味着有更大的能量消耗,即便再生制动能回收一些能量,但为了确保制动系统的效能,电制动仍然能量损失较大。制动系统消耗能量巨大也是影响电动汽车续航里程的重要因素之一。



此外,轮毂电机工作的环境恶劣,面临水、灰尘等多方面的影响,在密封方面也有较高要求,同时在设计上也需要为轮毂电机单独考虑散热问题。

五、轮毂电机的发展与应用

1. 国外轮毂电机的发展

轮毂电机并非新兴事物,早在 1900 年,费迪南德·保时捷就提出了把电机装到车轮子上的想法,并首先制造出了前轮装备轮毂电机的电动汽车。20 世纪 50 年代初,美国人 Robert 便发明了电动汽车轮毂电机,并申请了专利,其将电动机、传动系统和制动器集成到轮毂装置内。美国通用汽车高级技术研制中心成功将自行研制的轮毂电机应用到雪佛兰 S-10 皮卡车中,应用轮毂电机仅仅给车轮增加了 15 kg 的质量,却可以产生约 26 kW 的功率,产生的驱动扭矩比普通雪佛兰 S-10 四缸皮卡车高出了 60%,加速性能也有所提升。

而乘用车所用的轮毂电机,日系厂商对于此项技术研发较早,目前处于领先地位,包括通用、丰田在内的国际汽车巨头都对该技术有所涉足。

图 2-54 所示为本田轮毂电机。



图 2-54 本田轮毂电机

图 2-55 所示为通用公司开发的 150 t 重型卡车轮毂电机。

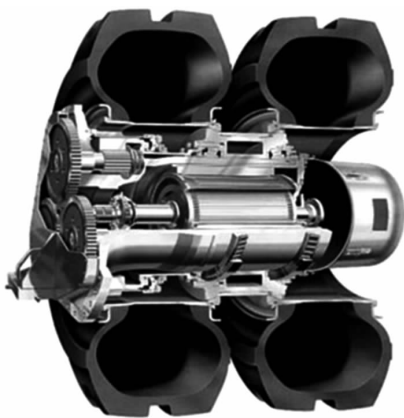


图 2-55 通用公司开发的 150 吨重型卡车轮毂电机



福特汽车公司联手国际著名汽车零部件厂商舍弗勒(Schaeffler)以福特嘉年华车型为基础开发了 eWheelDrive 轮毂电机驱动汽车,如图 2-56 所示。eWheelDrive 轮毂电机驱动系统将独立的电机集成于两个后轮毂中。

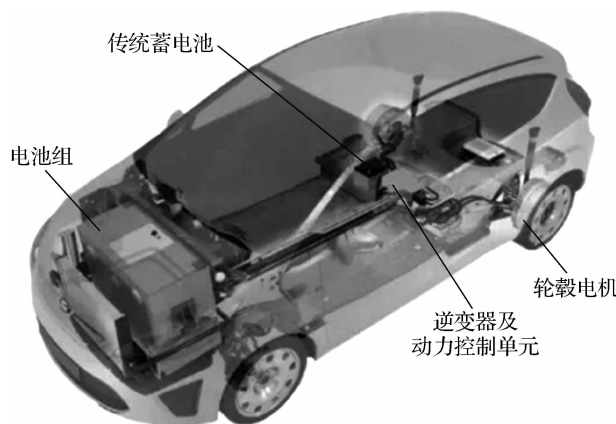


图 2-56 福特嘉年华“eWheelDrive”版采用轮毂电机的电动汽车

图 2-57 所示为用于福特嘉年华电动汽车的轮毂电机。该电机适配传统 18 英寸轮毂,每个轮毂电机都有独立的控制电力电子器件并封装集成为一体,通过与整车控制器实时通信实现分布式控制和驱动。



图 2-57 用于嘉年华电动汽车的轮毂电机

2. 我国轮毂电机技术的发展

我国的轮毂电机技术起步较晚,但随着国家电动汽车政策指引,近年来各高级院校加大了在此技术上的研发投入,各汽车厂商也试图通过外延并购的方式引入国外先进技术。例如,同济大学研发的“春晖”系列电动汽车就采用了轮毂电机结构;一汽大众和 Protean Electric 合作生产了验证演示车;万安科技与 Protean 股权合作战略布局轮毂电机技术,加速推进轮毂电机技术在国内落地和产业化;康盛股份旗下子公司成都联腾也将轮边驱动系统运用于集团的新能源大巴车中。

比亚迪公交电动汽车轮毂电机如图 2-58 所示,可以看出,其电机还是轮边电机,不是严



格意义上的轮毂电机。

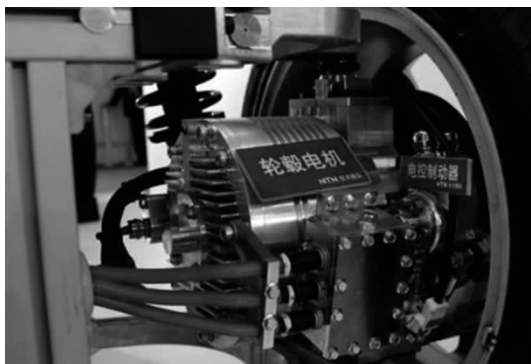


图 2-58 比亚迪轮毂电机在纯电动公交车装车实物

图 2-59 所示为采用轮毂电机的奇瑞瑞麒 XI-EV 电动汽车。



图 2-59 采用轮毂电机的奇瑞瑞麒 XI-EV 电动汽车

3. 轮毂电机应用优势

电动汽车轮毂电机与车轮集成在一起,布置灵活,可以方便地实现前轮驱动、后轮驱动或者四轮驱动。与内燃机驱动系统或者集中驱动电动系统相比,轮毂电机驱动系统在动力源配置、底盘结构等方面有其独特的技术特征和优势,具体体现在以下几方面:

(1)动力传递由硬连接改为软连接形式,省略了传统汽车所需的机械式操纵换挡装置、离合器、变速器、传动轴和机械差速器等,使得电动汽车驱动系统和整车结构简洁、有效,可利用空间大。

(2)可以方便地通过电子线控技术,实现各轮毂电机从零到最大速度的无级变速,以及各车轮之间的差速。

(3)各轮毂电机的驱动力直接独立可控,使其动力学控制更为灵活、方便,能合理地控制各轮毂电机的驱动力,从而提高恶劣路面条件下的行驶性能。

(4)容易实现各轮毂电机的电气制动、机电复合制动和制动能量回收,提高能源利用率。采用四轮驱动方式时,可以最大限度地回收制动能量。

(5)底架结构大为简化,使整车总布置和车身造型设计的自由度大大增加。若采用动力



平台方式,将动力平台嵌入不同的车身造型,则可方便地实现产品多样化和系列化,缩短新车型的开发周期,降低开发成本。

(6)在采用轮毂电机驱动系统的四轮电动汽车上,若进一步引入线控四轮转向技术,则可以进一步提高整车的行驶性能。



练习与思考

一、填空题

1. 轮毂电机技术又称_____技术,它的最大特点就是 将_____、_____和_____装置都整合到_____内,因此将电动汽车的_____部分大大_____。
2. 轮毂电机动力系统通常由_____、_____、_____与_____系统等组成。轮毂电机动力系统根据_____形式主要分成_____和_____两种结构。
3. 外转子型采用_____电机,电机的最高转速在_____左右,无任何_____装置,电机的_____与车轮的_____固定或者_____在一起,车轮的_____与_____相同。
4. 内转子型则采用_____电机,同时装备固定传动比的_____。为了获得较高的_____密度,电机的转速通常高达_____。
5. 轮毂电机按电机的类型又可分为_____、_____、_____式。
6. 轮毂电机的驱动方式主要分为_____和_____。

二、简答题

1. 轮毂电机按电机可分为哪几种? 各有何特点?
2. 简述减速驱动方式及其优缺点。
3. 简述直接驱动方式及其优缺点。

任务七



比亚迪 E6 驱动电机结构原理与检测

知识目标

- ➔ 了解比亚迪 E6 驱动电机的内部结构和外部连接。
- ➔ 熟悉比亚迪 E6 驱动电机的工作原理。

技能目标

- ➔ 能对比亚迪 E6 驱动电机的控制电路进行分析。
- ➔ 会对比亚迪 E6 驱动电机进行相关检测。



学习内容

一、比亚迪 E6 驱动电机的主要参数

比亚迪 E6 驱动电机为永磁同步电机,具有高密度、小型轻量化、高效率、高可靠性、高耐久性、强适应性等优点。

该电机主要由外圈的定子与内圈的转子组成,是电动汽车的唯一动力源,可向外输出扭矩,驱动汽车前进或后退;同时也可以作为发电机发电,如在高坡下滑、高速滑行以及制动过程中把势能或者动能化为电能存储。

比亚迪 E6 驱动电机主要参数如下:

- (1)最大输出扭矩: $450 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。
- (2)最大输出转速: $7\,500 \text{ r/min}$ 。
- (3)额定功率: 75 kW 。
- (4)最大功率: 120 kW 。

比亚迪 E6 电动汽车驱动电机如图 2-60 所示。

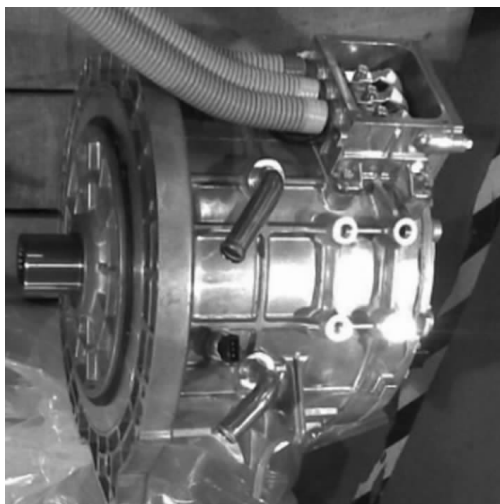


图 2-60 比亚迪 E6 电动汽车驱动电机

二、比亚迪 E6 驱动电机的结构原理

比亚迪 E6 驱动电机主要由机壳、定子总成、转子总成、旋转变压器、水温传感器和线束等组成。图 2-61 所示为比亚迪 E6 电动汽车驱动电机外部连接示意图。图 2-62 所示为比亚迪 E6 驱动电机带绕组定子铁心及转子组件。

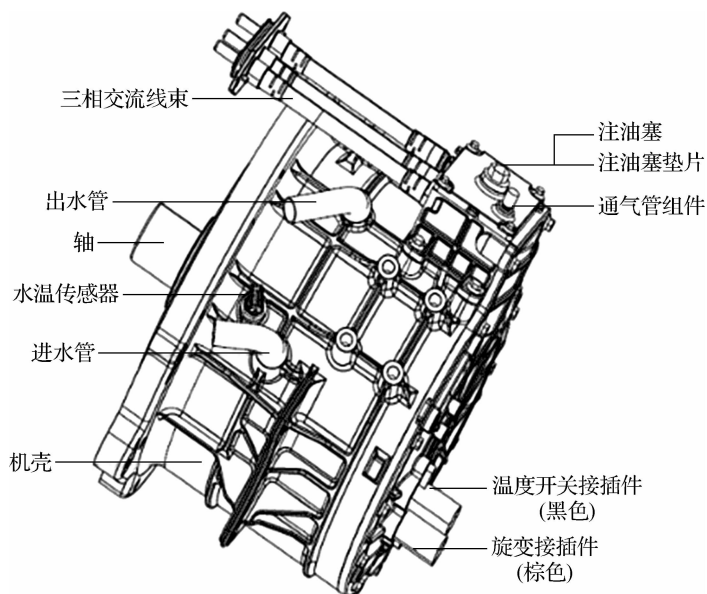


图 2-61 比亚迪 E6 电动汽车驱动电机外部连接示意图



图 2-62 比亚迪 e6 驱动电机带绕组定子铁心及转子组件(75 W)

定子总成产生三相交变的旋转磁场驱动转子旋转,并能将转子旋转的机械能转变为电能储存在动力电池中。定子总成主要由定子铁心和定子绕组组成,定子铁心由冲压后的硅钢片紧密叠加而成,在铁心内环的楔形槽中镶嵌着空间交替均布的呈“Y”型连接的三相绕组。

转子总成在电机的气隙中建立足够的磁场。转子的铁心是用硅钢片叠加起来的,在铁心的槽中安装有 8 个内嵌式用钕铁硼稀土材料制成的永磁体磁极(图 2-63),从而产生永久磁场,在转子上没有线圈,既简化了电机结构,提高了运行的可靠性,又没有转子铜耗,提高了电机的效率。

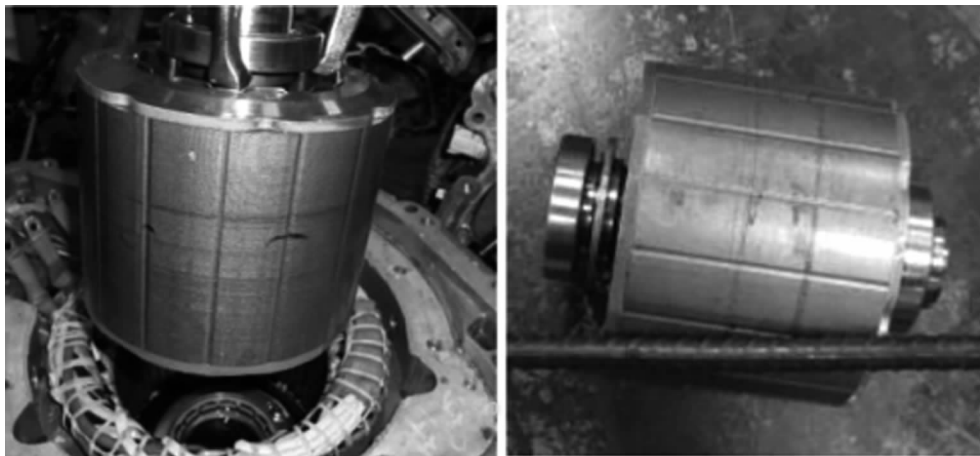


图 2-63 驱动电机转子

图 2-64 所示为驱动电机原理示意图。

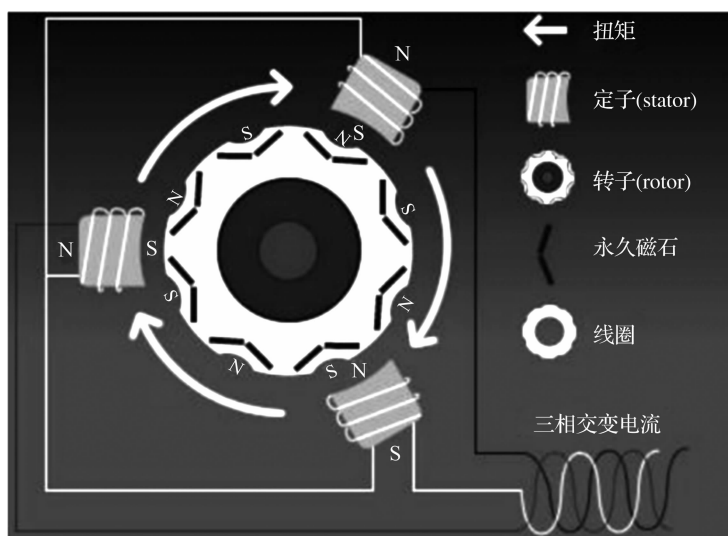


图 2-64 驱动电机原理示意图

图 2-65 所示为驱动电机性能曲线图。

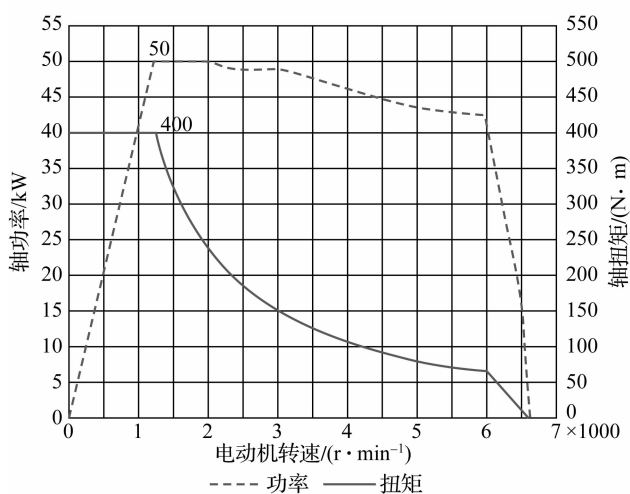


图 2-65 驱动电机性能曲线图

当车辆行驶时,电机通过旋转变压器(后边介绍)检测到电机的速度和位置信号,传递给电机控制器进行处理,通过相关逻辑信号控制 IGBT 的通断,输出近似正弦波的交流电控制电机的转动,输出较大的转矩来保证电动汽车的频繁启动功能,保证电动汽车有良好的加速和减速性能,在低速或者爬坡时能输出高转矩,同时也能满足在高速行驶时对电机的高转速要求。

三、比亚迪 E6 驱动电机的控制电路

比亚迪 E6 驱动电机的控制电路如图 2-66 所示。

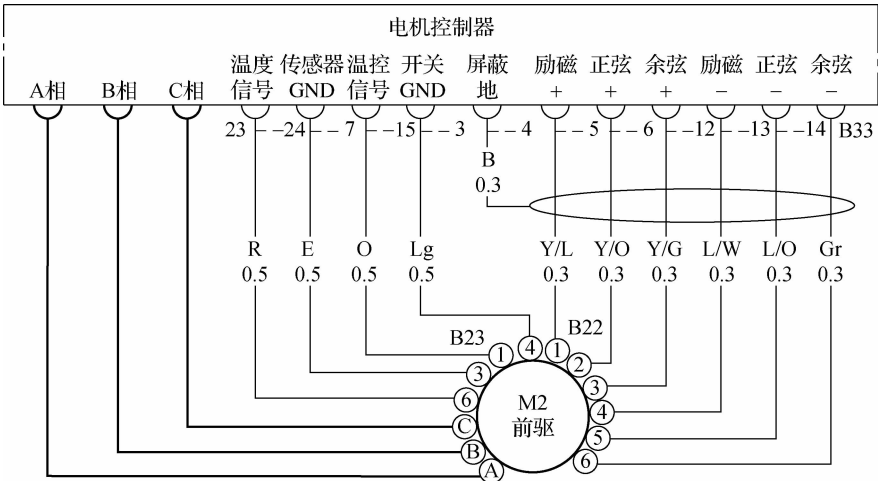
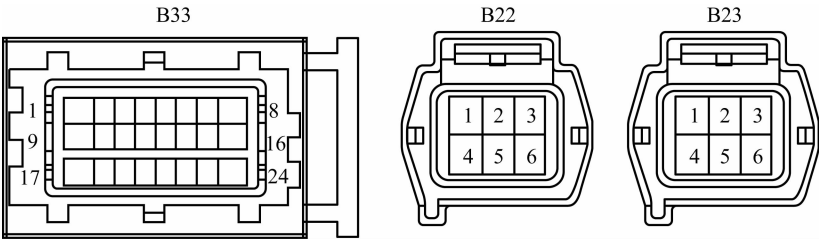


图 2-66 比亚迪 E6 驱动电机控制电路

驱动电机控制相关线束插头如图 2-67 所示。



B33—电机控制器低压线束插头；B22—旋变（棕色）；B23—温度传感器（黑色）线束插头。

图 2-67 电机控制相关线束插头

四、比亚迪 E6 驱动电机的相关检测

限于当前电动汽车售后服务的技术现状和生产厂家的情况,电动汽车驱动电机检测的重点是外围检测,如旋变变压器、温度传感器等的检测。在维修站由技师通过诊断仪(比亚迪 ED400)读取 MG2(驱动电机)的故障信息及相关数据加以检测。

无论是通过诊断仪诊断还是通过人工对故障加以分析判断,检测比亚迪 E6 驱动电机时应注意:

- (1) 根据实际检测需要,确保在检查之前拔下维修开关,并将维修开关放置在指定位置或由专人看管,以防其他技师重新连接。
- (2) 根据实际检测需要,关闭点火开关或从辅助蓄电池上断开负极端子电缆。



(3) 根据实际检测需要,做好高压安全防护(穿戴绝缘手套、绝缘胶鞋、防护眼镜)。

(4) 熟练使用万用表,掌握驱动电机、控制器、旋变电路的结构及各诊断数据,形成初步判断驱动电机、控制器及旋变电路故障的能力。

1. 驱动电机相关电路的检测

1) 驱动电机三相动力电缆线的检测

驱动电机三相动力电缆线的检测是指驱动电机与电机控制器之间三相动力电缆线的检测,主要检查导线的导通性以及连接处的紧固情况。

操作步骤如下:

(1) 确认点火开关置于 OFF 挡位、动力电池维修开关已拔掉。

(2) 选择绝缘工具,按照规范操作要求,将电机控制器侧与驱动电机侧三相电缆接头拆下,操作时观察导线外皮是否完好、有无破损、是否固定牢固。

(3) 如图 2-68 所示,选择万用表电阻挡或蜂鸣挡,两根表笔分别接触电缆对应的两端,导线两端的阻值应小于 $0.5\ \Omega$ 。

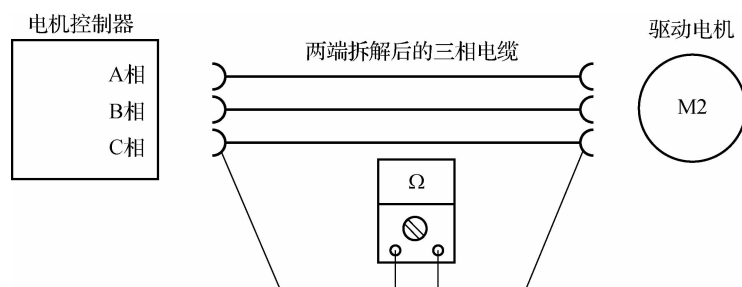


图 2-68 驱动电机三相线缆的检查

也可以仅把电机控制器侧的三相电缆拆出,用万用表电阻挡分别测量三相电缆中任意两相导线间的电阻值,均应相同且阻值很小,以此判断三相电缆线的导通性。

2) 驱动电机旋变电路的检测

驱动电机旋变电路的检测包括励磁、正弦和余弦各线圈与电机控制器电路的检查。下面以励磁线圈(+)电路为例。

操作步骤如下:

(1) 确认点火开关置于 OFF 挡位、动力电池维修开关已拔掉。

(2) 把电机控制器低压线束连接器、电机旋变线束插头拔掉。

(3) 选择万用表电阻挡或蜂鸣挡。

(4) 如图 2-69 所示,红、黑表笔分别触接励磁线圈(+)对应的线束插头位置。

(5) 每根导线两端的阻值应小于 $0.5\ \Omega$,说明插接器接触良好、无氧化、无退针现象。

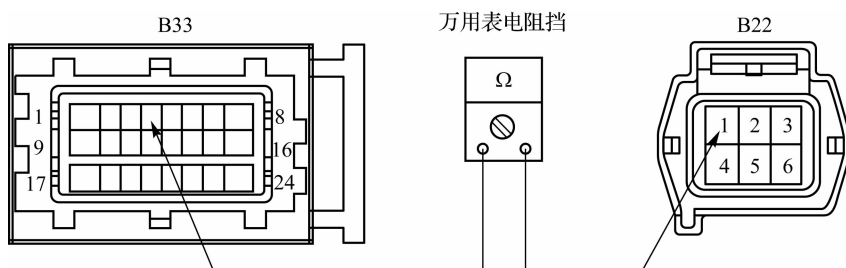


图 2-69 旋变电路的检查(励磁+)

3) 驱动电机温度传感器电路的检测

驱动电机温度传感器电路的检测包括温度传感器和温控开关与电机控制器电路的检查。下面以温度传感器信号电路为例。

操作步骤如下：

- (1) 确认点火开关置于 OFF 挡位、动力电池维修开关已拔掉。
- (2) 把电机控制器低压线束连接器、电机温度传感器线束插头拔掉。
- (3) 选择万用表电阻挡或蜂鸣挡。
- (4) 如图 2-70 所示,红、黑表笔分别触接温度传感器信号对应的线束插头位置。

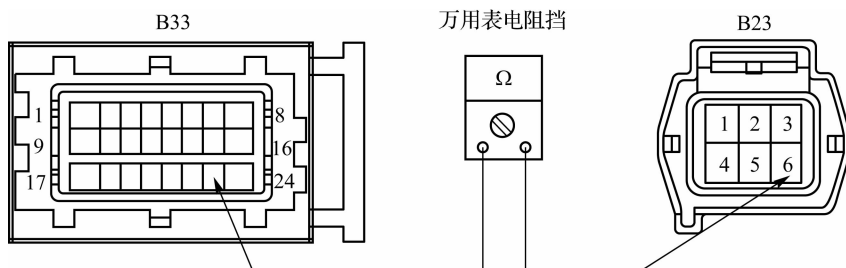


图 2-70 温度传感器信号电路的检查

- (5) 每根导线两端的阻值应小于 $0.5\ \Omega$,说明插接器接触良好、无氧化、无退针现象。

2. 驱动电机相关器件的检测

1) 电机三相绕组的检查

操作步骤如下：

- (1) 确认点火开关置于 OFF 挡位、动力电池维修开关已拔掉。
- (2) 选择绝缘工具,按照规范操作要求,将电机控制器侧三相电缆接头拆下。
- (3) 选择万用表电阻挡。
- (4) 如图 2-71 所示,红、黑表笔分别触接三相绕组中每两相绕组,万用表电阻均应为导通状态(因绕组漆包线较粗,故阻值较小),否则,应判断电机绕组断路。

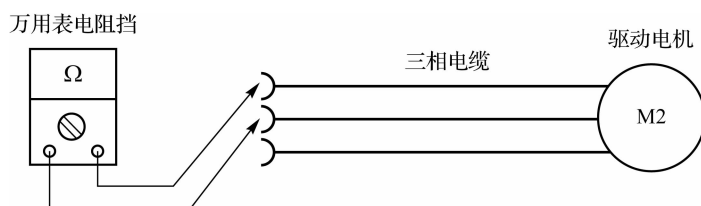


图 2-71 驱动电机三相绕组的检查

2) 温度传感器的检查

操作步骤如下：

(1) 在确认点火开关置于 OFF 挡位的情况下，将电机上温度传感器 B23 黑色线束连接器拔掉。

(2) 选择万用表电阻挡。

(3) 如图 2-72 所示，红、黑表笔分别触接在电机侧温度传感器 B23 黑色插头(公)的 3 脚与 6 脚。

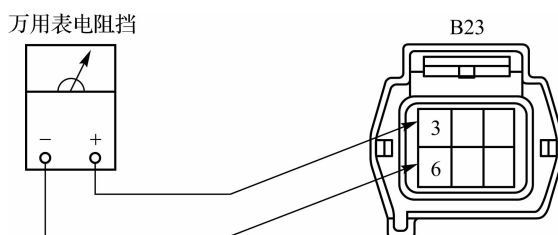


图 2-72 驱动电机温度传感器阻值的检查

(4) 常温下传感器阻值应在 $(7 \pm 1) \text{ k}\Omega$ 左右(负温度系数热敏电阻)，若不符合标准则可判断其已损坏。

3) 温控开关的检查

操作步骤如下：

(1) 在已经拔下的电机侧温度传感器 B23 黑色插头(公)的 1 脚与 4 脚连接万用表电阻挡的两个表笔，如图 2-73 所示。

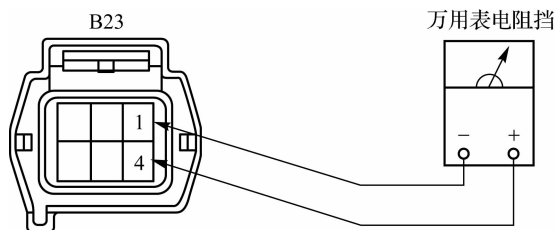


图 2-73 驱动电机温控开关的检查

(2) 电机正常温度时温控开关应为导通状态，若不符合标准则可判断其已损坏。



4) 旋变绕组的检查

操作步骤如下：

(1) 在确认点火开关置于 OFF 挡位的情况下, 将电机上旋变传感器 B22 棕色线束连接器拔掉。

(2) 选择万用表电阻挡。

(3) 以旋变励磁绕组为例, 如图 2-74 所示, 红、黑表笔分别接触旋变传感器 B22 棕色插头(公)的 4 脚与 1 脚。

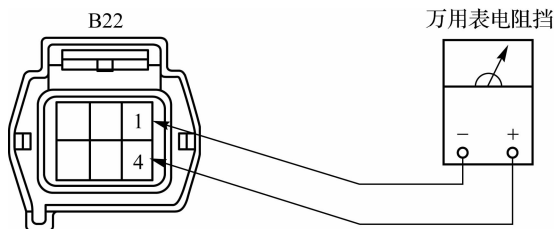


图 2-74 旋变励磁绕组的检查

(4) 正常时励磁绕组阻值为 $(8.1 \pm 2) \Omega$, 若不符合标准, 可判断旋转变压器故障。

正弦绕组、余弦绕组检查方法同上, 只是线圈阻值均为 $(14 \pm 2) \Omega$ 。

3. 驱动电机相关电压的检测

1) 电机温度传感器参考电源电压的检测

操作步骤如下：

(1) 在确认点火开关置于 OFF 挡位的情况下, 将电机上温度传感器 B23 黑色线束连接器拔掉。

(2) 选择万用表直流电压挡。

(3) 如图 2-75 所示, 红表笔触接温度传感器 B23 黑色线束插头(母)的 6 脚, 黑表笔搭铁或触接 B23 的 3 脚。

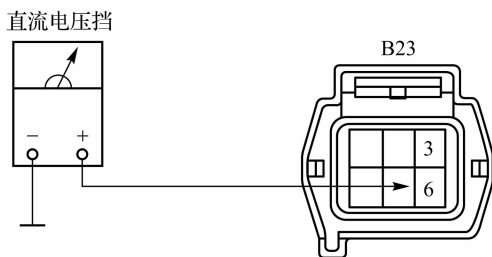


图 2-75 温度传感器参考电源电压的检测

(4) 点火开关置于 ON 挡, 正常时应有来自电机控制器为其提供的 5 V 参考电源电压, 若不符合标准, 在排除电路故障的前提下, 则可判断电机控制器内部故障。

2) 电机温控开关电源电压的检测

操作步骤如下：



(1)在已经拔下的温度传感器 B23 黑色线束插头(母)的 1 脚连接直流电压的黑表笔,红表笔连接任意正极或 B23 的 6 脚,如图 2-76 所示。

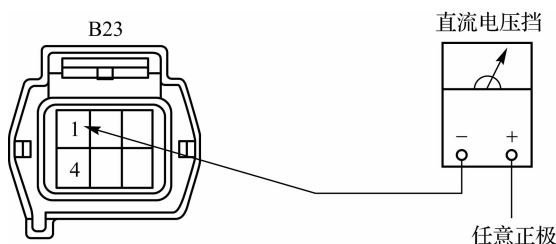


图 2-76 温控开关电源的检测

(2)点火开关置于 ON 挡,正常时应有来自电机控制器为其提供的负极性的开关电源电压,若不符合标准,在排除电路故障的前提下,则可判断电机控制器内部故障。

3) 旋变绕组参考电源电压的检测

操作步骤如下:

(1)在确认点火开关置于 OFF 挡的情况下,将电机上旋变传感器 B22 棕色线束连接器拔掉。

(2)选择万用表直流电压挡。

(3)以旋变励磁绕组(+)为例,在旋变传感器 B22 棕色线束插头(母)的 1 脚连接红表笔,黑表笔搭铁,如图 2-77 所示。

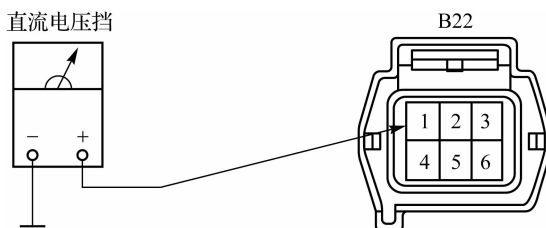


图 2-77 旋变励磁绕组参考电源电压的检测

(4)点火开关置于 ON 挡,正常时应有来自电机控制器为其提供的参考电源电压 2.5 V,若不符合标准,在排除电路故障的前提下,则可判断电机控制器内部故障。

旋变绕组 6 根导线的对地电压均为 2.5 V,其他绕组参考电源电压的检测步骤同上。



练习与思考

综合题

绘制图 2-66 所示比亚迪 E6 驱动电机控制电路原理图,完成下列任务。

1. 详述驱动电机与电机控制器之间三相动力电缆线的检测。



2. 详述电机控制器与电机旋变变压器、温度传感器之间电路的检测。
3. 详述驱动电机温度传感器阻值的检测。
4. 详述驱动电机温控开关的检测。
5. 详述驱动电机旋变传感器线圈的检测。
6. 详述驱动电机温度传感器参考电源电压的检测。
7. 详述驱动电机旋变传感器参考电源电压的检测。
8. 详述驱动电机温控开关电源电压的检测。

任务八



旋转变压器

知识目标

- ➔ 了解旋转变压器在电机控制中的作用。
- ➔ 熟悉旋转变压器的结构原理。

技能目标

- ➔ 会分析旋转变压器电路。
- ➔ 能看懂比亚迪 E6 驱动电机中的旋变结构。



学习内容

一、旋转变压器概述

旋转变压器是一种电磁式传感器,又称同步分解器。它是一种小型的交流电机,用来测量旋转物体的转轴角位移和角速度,由定子和转子组成,如图 2-78 所示。其中定子绕组作为变压器的原边,接受励磁电压,励磁频率通常为 400 Hz、3 000 Hz 及 5 000 Hz 等。转子绕组作为变压器的副边,通过电磁耦合得到感应电压。

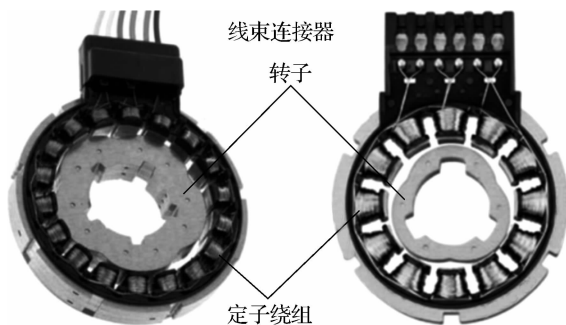


图 2-78 旋转变压器



1. 旋转变压器的发展

早期的旋转变压器用于计算解答装置中,作为模拟计算机的主要组成部分之一。其输出是随转子转角做某种函数变化的电气信号,通常是正弦信号、余弦信号、线性信号等。这些函数输出是最常见的,也是容易实现的。在对绕组做专门设计时,也可产生某些特殊函数的电气输出。但这样的函数只用于特殊的场合,不是通用的。

旋转变压器之后逐渐用于伺服系统,作为角度信号的产生和检测元件。因此作为角度信号传输的旋转变压器,有时被称作四线自整角机。随着电子技术和数字计算技术的发展,数字式计算机早已代替了模拟式计算机,因此,实际上旋转变压器目前主要是用于角度位置伺服控制系统中。因为两相的旋转变压器比自整角机更容易提高精度,所以旋转变压器应用得更广泛。特别是在高精度的双通道、双速系统中广泛应用的多极电气元件,原来多为多极自整角机,现在基本上都是多极旋转变压器。

随着电子工业的发展,电子元器件集成化程度大幅提高,元器件的价格大大下降;另外,信号处理技术的进步使旋转变压器的信号处理电路变得简单、可靠,价格也大大下降。而且,又出现了软件解码信号处理方式,使得信号处理变得更加简单。这样,旋转变压器的应用得到了更大的发展,其优点得到了更大的体现。

2. 旋转变压器的应用

旋转变压器的应用近期发展得很快。除了传统的、要求可靠性高的军事、航空航天领域之外,旋转变压器在工业、交通以及民用领域也得到了广泛的应用。特别应该提出的是,近年来随着工业自动化水平的提高,节能减排的要求越来越高,效率高、节能显著的永磁交流电机的应用越来越广泛。例如,无论是冰箱、空调,还是洗衣机等家电,目前都在向变频变速发展,采用的就是正弦波控制的永磁交流电机。而永磁交流电机的位置传感器原来以光学编码器居多,但近年来正迅速被旋转变压器代替。

在目前各国都非常重视的电动汽车中,所用的位置传感器、速度传感器都是旋转变压器。如驱动用电动机和发电机的位置传感器、电动助力方向盘电动机的位置长传感、速度传感器等,都是采用旋转变压器。

在塑压、纺织、冶金以及其他领域里,所用伺服系统中的关键部件——伺服电动机上,也是用旋转变压器作为位置、速度传感器的。

旋转变压器的应用已经成为一种趋势。

3. 旋转变压器的分类

1) 按有无电刷与滑环的滑动接触分类

按有无电刷和滑环的滑动接触,可将旋转变压器分为接触式和无接触式两种。

(1) 接触式旋转变压器通过电刷和滑环将绕组和外电路进行连接。

(2) 无接触式旋转变压器通过环型耦合变压器来取代电刷和滑环的作用将绕组和外电路进行连接,也称无刷式旋转变压器,目前应用较为广泛。

早期的旋转变压器都是有刷结构,电刷和滑环之间有滑动接触,使得寿命和可靠性都受



到限制,而且会产生噪声,因此被无刷式旋转变压器取代。如今所说的旋转变压器,基本指的是无刷式旋转变压器。

2)按极对数分类

旋转变压器按极对数的多少,可以分为单对极旋转变压器和多对极旋转变压器两种。其中多对极旋转变压器为了提高角度测量的精度,一般使用时与被测电机的极对数匹配一致。

既有单独使用的多对极旋转变压器,也有多对极旋转变压器和单对极旋转变压器组合使用的统一系统。在组成的统一系统中,如果单对极旋转变压器和多对极旋转变压器各自拥有自己的定子、转子铁心,那么这种结构被称为单通道旋转变压器。如果单对极旋转变压器和多对极旋转变压器共用一套定子、转子铁心,而分别有自己的单对极绕组和多对极绕组,那么这种结构被称为双通道旋转变压器。一般双通道结构的旋转变压器较多。

在按极对数分类的旋转变压器中,目前应用较多的是单对极旋转变压器、多对极旋转变压器和双通道旋转变压器。

3)按输出电压与转子转角间的函数关系分类

按输出电压与转子转角间的函数关系,旋转变压器可分为正弦、余弦、线性和比例等类型旋转变压器。

4)按转子上有无绕组分类

按转子上有无绕组,旋转变压器可分为无刷式和磁阻式。

无刷式旋转变压器通过环型耦合变压器来实现转子绕组和外电路的连接,但是环型耦合变压器的存在,造成旋转变压器的尺寸、体积、质量较大,在一些空间有限的场合应用受到限制。

磁阻式旋转变压器(VR 旋转变压器)转子上不装绕组,而把励磁和信号绕组都安放在定子上。磁阻式旋转变压器是根据磁阻变化原理设计的一种无接触式旋转变压器,随着转子位置角的变化,气隙磁导不断变化,气隙磁密也不断变化,从而导致定子上信号绕组的感应电动势不断变化。

5)按输入输出相数分类

按输入励磁电压及输出电压的相数,可以将旋转变压器分为 1 相励磁/2 相输出(BRX)、2 相励磁/1 相输出(BRT)、2 相励磁/2 相输出(BRS)三种类型。其中 1 相励磁/2 相输出(BRX)旋转变压器应用最广。

6)按装配方式分类

按照装配方式旋转变压器可分为分装式和组装式。

二、旋转变压器的结构原理

旋转变压器的工作原理和普通变压器基本相似,但也有所区别:普通变压器的原边、副边绕组是相对固定的,因此输出电压和输入电压之比是常数,其工作原理如图 2-79 所示;旋转变压器的一次侧与二次侧不是固定安装的,而是相对运动的,随着两者相对角度的变化,

在输出侧就可以得到幅值变化的波形,其工作原理如图 2-80 所示。

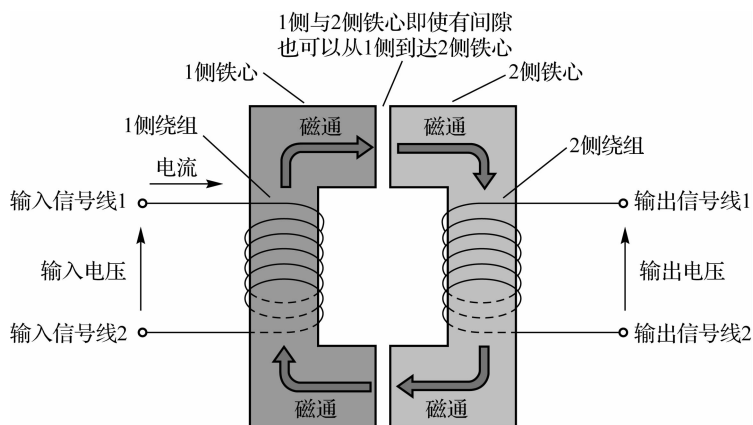


图 2-79 变压器工作原理

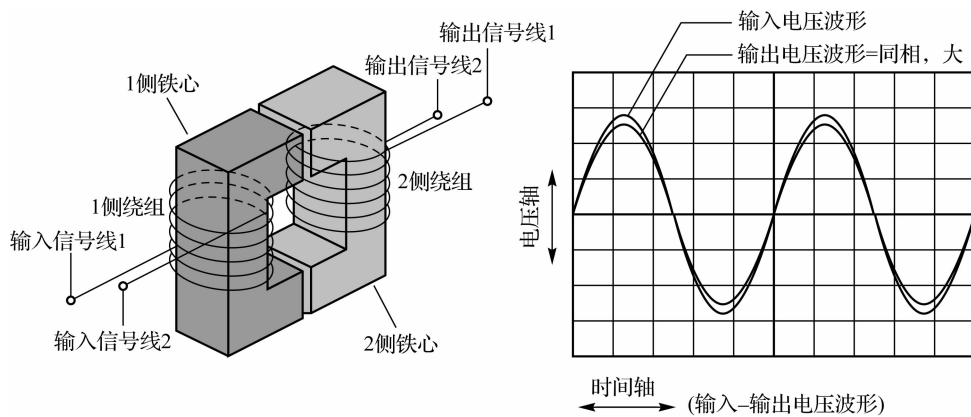


图 2-80 旋转变压器工作原理(1)

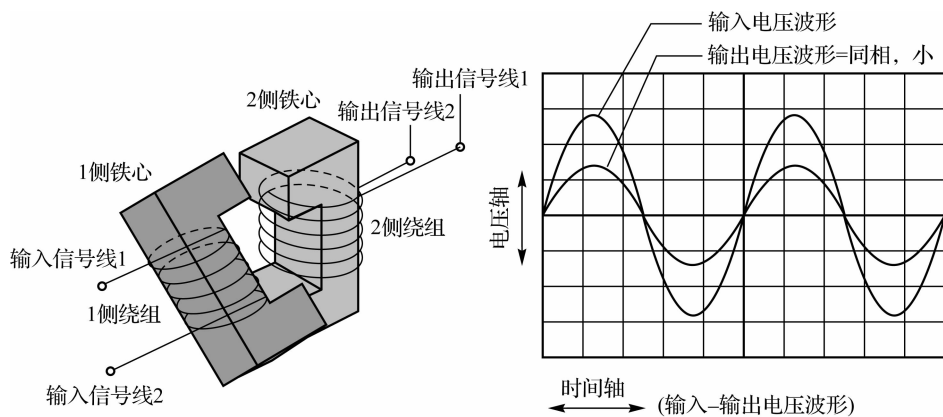


图 2-80 旋转变压器工作原理(2)

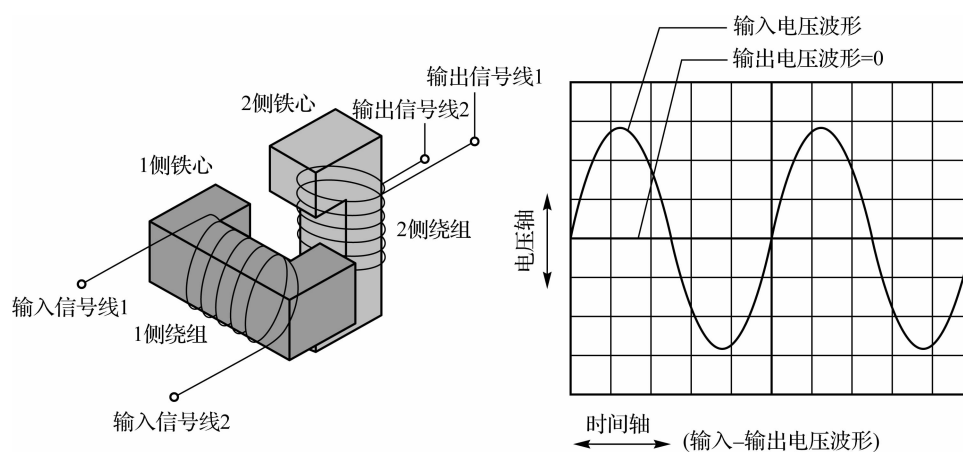


图 2-80 旋转变压器工作原理(3)

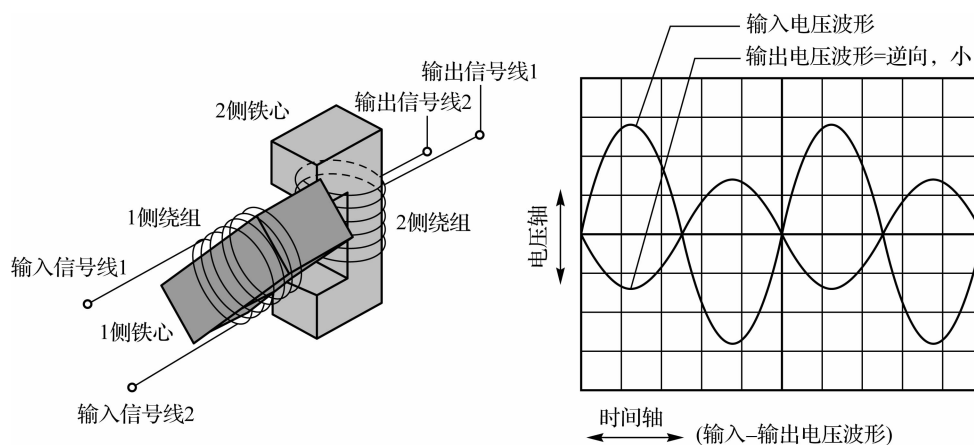


图 2-80 旋转变压器工作原理(4)

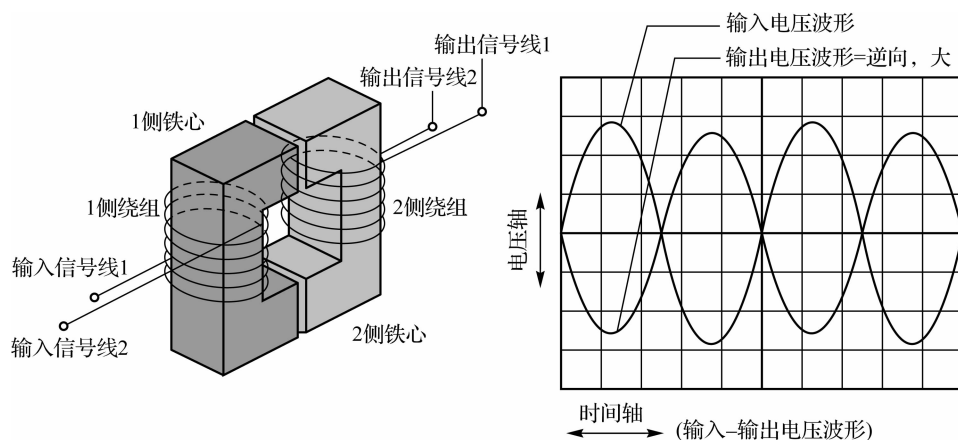


图 2-80 旋转变压器工作原理(5)

旋转变压器就是基于以上原理设计的:输出信号幅值随一次侧、二次侧相对位置变化而变化,但频率不变。实际应用时,旋转变压器中设置两组输出线圈,两者相位差为 90° ,从而可以输出幅值呈正弦变化与余弦变化的两组信号。

旋转变压器内部结构原理图如图 2-81 所示。

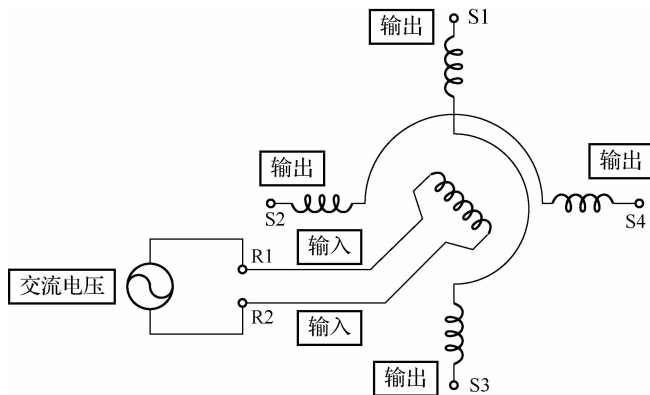


图 2-81 旋转变压器内部结构原理图

三、磁阻式旋转变压器

磁阻式旋转变压器是依据电磁感应原理,利用气隙变化和磁阻变化,而使输出绕组的感生电压随机械转角做相应正弦或余弦变化的角度传感元件。

1. 磁阻式旋转变压器简介

磁阻式旋转变压器是一种新型结构高精度角位置传感器,具有结构简单、工作可靠及适应高速运行等特点。

磁阻式旋转变压器与传统线绕式旋转变压器的工作原理区别较大。传统线绕式旋转变压器的气隙均匀,通过转子信号绕组与定子励磁绕组之间的相对位置变化来计算转子转角位置变化。而磁阻式旋转变压器的信号绕组和励磁绕组均固定在定子上,仅通过转子凸极效应产生具有正弦轨迹的气隙磁导变化,在信号绕组中感应出正、余弦信号。

2. 磁阻式旋转变压器的结构

与传统的线绕式旋转变压器的结构不同,磁阻式旋转变压器的励磁绕组和输出绕组均安置在定子铁心的槽中,转子不放任何绕组,以实现无接触运行。定子冲片内圈冲制有若干大齿(也称极靴),每个大齿上又冲制若干等分小齿,绕组安放在大齿槽中。转子外圆表面冲制有若干等分小齿,其数与极对数相等。输出和输入绕组均为集中绕制,其正、余弦绕组的匝数按正弦规律变化。

图 2-82 所示为磁阻式旋转变压器结构示意图。

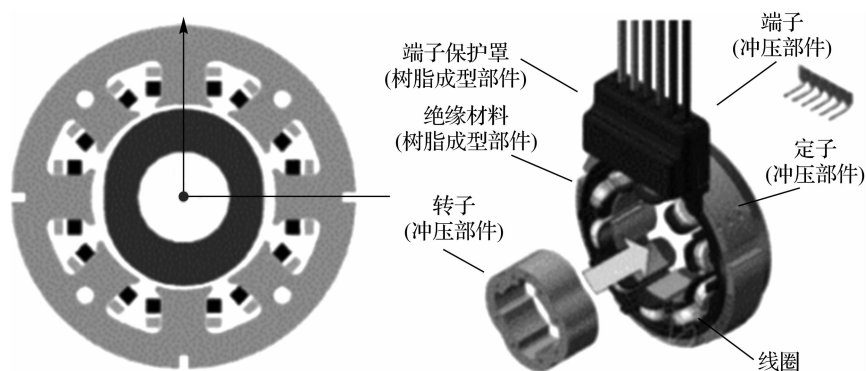


图 2-82 磁阻式旋转变压器结构示意图

3. 磁阻式旋转变压器的工作原理

图 2-83 所示为磁阻式多极旋转变压器工作原理示意图,图中画出了 5 个定子齿,4 个转子齿。定子槽内安置了逐槽反向串接的输入绕组 1-1,以及两个间隔绕制反向串接的输出绕组 2-2 和 3-3。当转子相对定子转动时,空间的气隙磁导发生变化,每转过一个转子齿距,气隙磁导变化一个周期,转过一周,则变化转子齿数个周期。气隙磁导的变化,导致输入和输出绕组之间互感的变化,输出绕组感应的电动势亦发生变化。

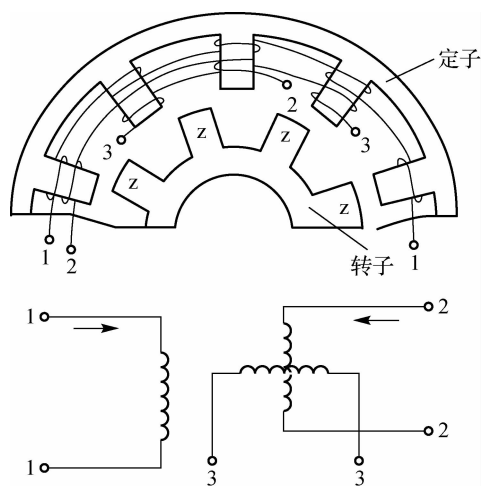


图 2-83 磁阻式多极旋转变压器工作原理示意图

在电路设置上,旋转变压器一般采用频率为 1~10 kHz 的正弦交流电作为励磁信号,对旋转变压器输出的二相转角位置调制信号进行处理,得到以电量形式表达的位置信号,其输出电压形式与传统的正弦、余弦旋转变压器的输出电压形式相同。

图 2-84 所示为旋转变压器及其相关信号。

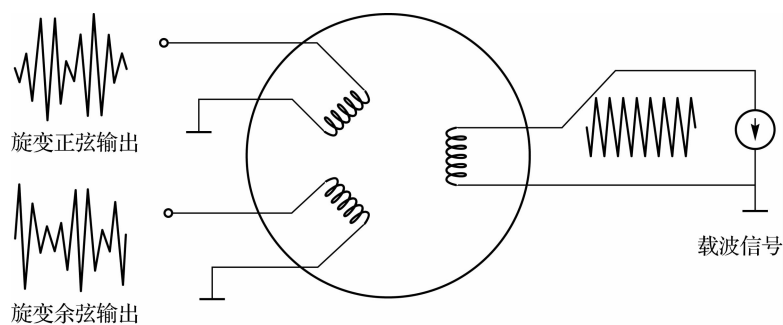


图 2-84 旋转变压器及其相关信号

四、比亚迪 E6 电动汽车旋转变压器

比亚迪 E6 电动汽车的驱动电机为永磁同步电机，采用磁阻式旋转变压器。图 2-85 所示为旋转变压器在电机中的位置。

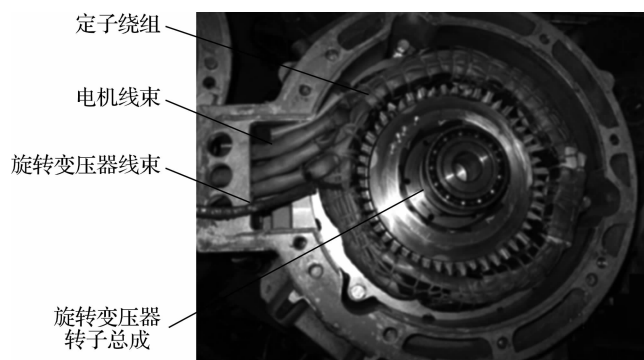


图 2-85 旋转变压器在电机中的位置

图 2-86 所示为驱动电机旋转变压器定子总成及安装位置。

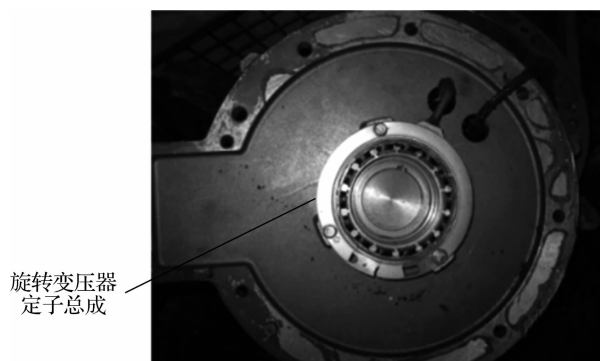


图 2-86 动力电机旋转变压器定子总成及安装位置



图 2-87 所示为驱动电机旋变定子总成。

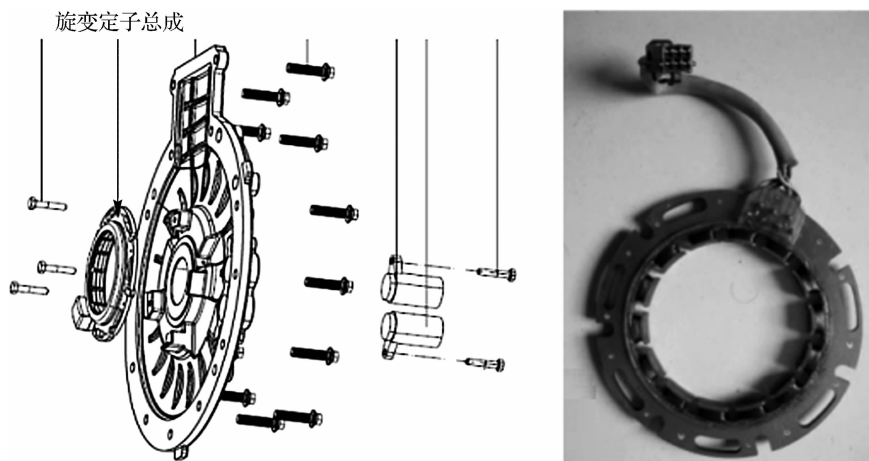


图 2-87 动力电机旋转变压器定子总成

图 2-88 所示为旋转变压器与电机控制器连接电路。

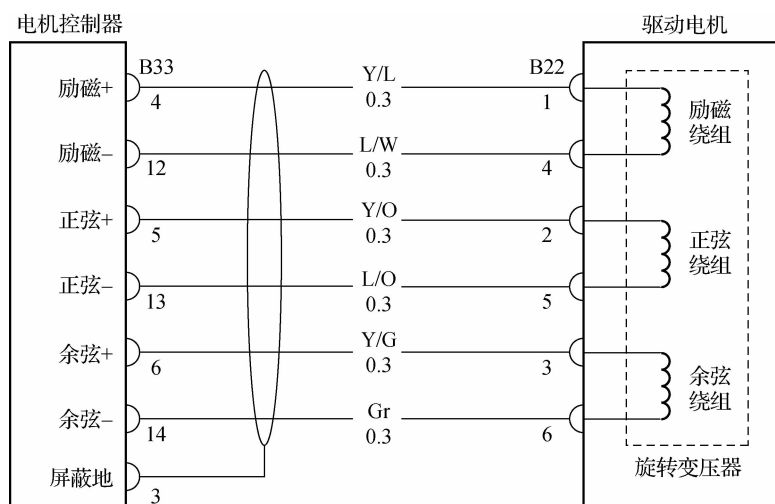


图 2-88 旋转变压器与电机控制器连接电路

旋转变压器绕组阻值：

励磁绕组：B22/1-B22/4 $(8.1 \pm 2)\Omega$

正弦绕组：B22/2-B22/5 $(14 \pm 2)\Omega$

余弦绕组：B22/3-B22/6 $(14 \pm 2)\Omega$



练习与思考

一、填空题

1. 旋转变压器是一种_____传感器, 又称_____。它是一种测量_____用的小型_____, 用来测量旋转物体的_____和_____, 由_____和_____组成。
2. 旋转变压器_____绕组作为变压器的_____, 接受_____电压, _____绕组作为变压器的_____, 通过_____得到_____电压。
3. 旋转变压器按极对数的多少, 可以分为_____旋变和_____旋变两种。
其中_____旋转变压器是为了提高_____测量的_____, 一般使用时与被测电机的_____匹配一致。
4. 磁阻式旋转变压器是根据_____原理设计的一种_____式旋转变压器, 随着转子_____的变化, _____不断变化, _____也不断变化, 从而导致_____上信号_____的_____不断变化。

二、简答题

1. 简述旋转变压器的工作原理。
2. 什么是磁阻式旋转变压器?

三、综合题

回答比亚迪 E6 电动汽车的相关问题:

1. 比亚迪 E6 电动汽车采用什么驱动电机?
2. 比亚迪 E6 电动汽车采用什么旋转变压器?
3. 绘制比亚迪 E6 电动汽车驱动电机控制器与电机旋变连接电路。