

第一章 直流牵引电机的特性

牵引电机是驱动机车车辆动轮轴的主电机，为了满足轨道交通运输生产的需要，必须对机车牵引性能提出一定要求，因此，牵引电机在设计参数选择和结构形式上不同于普通电机，而成为电机的一个单独类型。例如，牵引电机能产生足够大的牵引力，能方便和广泛调节速度，有较高的过载能力，具备先进经济技术指标等。

本章结合电力机车运行特点，介绍了牵引电机的一些特殊问题；分析了直流牵引电机的工作特性；比较了不同励磁方式下的直流牵引电机应用于电力牵引时的优缺点；简述了直流电机常用的启动、调速和制动方法；讨论了采用磁场削弱调速时的优点和存在的问题。

第一节 牵引电机的一般概念

一、牵引电机的传动和悬挂方式

牵引电机的安装和一般常见电机不同，它不是用地脚螺钉固定在基础上，而采用悬挂方式安装在机车上，并通过齿轮传动装置驱动机车轮对使机车行驶。因此，必须考虑到机车结构特点和运行要求，合理地选择传动方式和悬挂方式。同时也必须指出，传动和悬挂方式也对牵引电机的总体结构和外形尺寸起着制约作用。

牵引电机的传动方式通常分为个别传动和组合传动两种。

1. 个别传动

个别传动是目前国内外应用最为广泛的传动方式。所谓个别传动是指一台牵引电机只驱动一个轮对,它是借助电机输出轴上的小齿轮驱动轮对轴上的大齿轮来实现机车牵引运行的。

个别传动有以下两种悬挂方式。

(1) 抱轴式悬挂。

这种悬挂是指牵引电机一侧通过滑动轴承抱在机车动轮轴上,另一侧通过弹性缓冲装置悬挂在机车转向架的横梁上,如图 1-1 所示。这种悬挂的牵引电机,其质量约一半是直接压在机车的动轮轴上,称为簧下质量;另一半通过转向架经轴箱弹簧压在轮轴上,称为簧上质量。故这种悬挂方式有时也称为半悬挂。

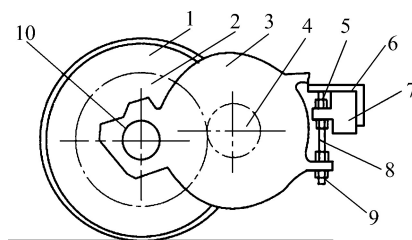


图 1-1 抱轴式悬挂示意图

1—机车动轮; 2—大齿轮; 3—牵引电机; 4—小齿轮; 5—橡胶件;
6—安全托板; 7—枕梁; 8—拉杆; 9—橡胶件; 10—轮轴

抱轴式悬挂结构简单、检修方便、成本较低。但由于这种悬挂方式牵引电机约一半的质量直接压在机车动轮轴上,且呈刚性连接,使车轮与钢轨之间的动力作用直接传到牵引电机,影响牵引电机的正常工作。此外,齿轮传动比由于受电机轴和轮轴之间中心距离的限制,电机尺寸也不能任意选择,这就限制了机车功率和速度的提高,一般适用于速度不超过 120 km/h 的客、货两用机车。

(2) 架承式悬挂。

对于构造速度较高的客运机车和电动车辆，抱轴式悬挂方式已不能适应运行要求，通常要采用架承式悬挂。所谓架承式悬挂就是将牵引电机完全固定在转向架上，这样，牵引电机的全部质量都成为转向架减振弹簧以上的质量，即成为簧上质量。因此，线路动力作用对牵引电机工作的不良影响将大为减少，克服了抱轴式悬挂的缺点。但这种悬挂方式由于牵引电机是簧上部分，在行车过程中，牵引电机的转轴中心线与机车动轴中心线会产生较大的相对移动。为此，必须改变传动结构，在牵引电机转轴和机车动轴之间装置弹性的或联轴节式的传动构件。通常不再将小齿轮（主动齿轮）直接装在电机转轴上，而是通过两个滚柱轴承装在齿轮箱上，并与装在机车动轮轴上的大齿轮相啮合。这时，牵引电机的转轴和小齿轮之间必须采用联轴节传动。

① 采用球面齿式联轴节的架承式悬挂。

采用球面齿式联轴节的架承式悬挂如图 1-2 所示。这种传动方式在我国主要应用在地铁电动车辆上。由图 1-2 可见，牵引电机全部悬挂在机车转向架上。它是在牵引电机机座一侧

的上方有两个悬臂，下方有一个支承，均用螺钉固定在转向架上，呈三点半悬挂。可见，电机在转向架上的悬挂结构比较简单。牵引电机转轴传动端与球面齿式联轴节相联，即电机转轴上安装球面齿轮，该球面齿轮传动联轴节内齿圈，内齿

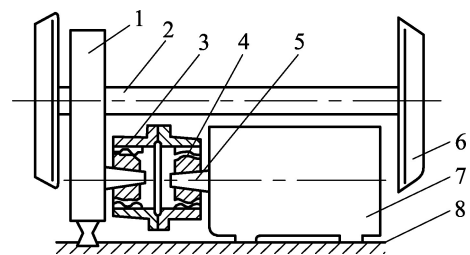


图 1-2 球面齿式联轴节的架承式悬挂

1—齿轮箱；2—动轮轴；3—内齿圈；4—球面齿轮；
5—电机轴；6—动轮；7—电机；8—转向架

圈又传动小齿轮轴上的球面齿轮，再传动小齿轮（装在齿轮箱内），最后传动大齿轮以驱动机

车行驶。这种传动方式不仅解决了机车运行中牵引电机转轴相对于机车动轮轴有位移而影响传动的问题，同时由于小齿轮不直接装在电机转轴上，故小齿轮和它的轴可以作成一体，从而可减少小齿轮的齿数以提高机车的速度和减轻电机的质量。这种传动方式的缺点是由于联轴节占用了空间，使电机的轴向尺寸缩短，故不适用于大功率干线机车中的牵引电机。

② 采用空心轴传动的架承式悬挂。

大功率牵引电机可采用空心轴传动方式。

空心轴传动可分为电枢空心轴和动轮空心轴两类。

采用电枢空心轴传动的架承式悬挂如图 1-3

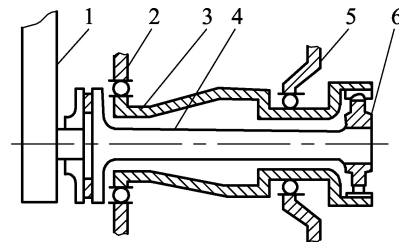


图 1-3 电枢空心轴传动的架承式悬挂

所示。这种传动方式是将电机的转轴作成空心的，该空心轴通过球面齿式联轴节与动轮轴相连，传动轴穿过空心轴的内腔，将转矩传给小齿轮（装在齿轮箱内）。由于利用了电机空心轴内腔的空间，节省了联轴节所占据的电机轴向空间，故电机可充分利用轴向长度尺寸，以提高牵引电机的功率。

1—传动齿轮箱；2，5—电机端盖；3—电枢空心轴；4—传动轴；6—球面齿式联轴节

电枢空心轴传动方式适用于车速不超过 160 km/h 的准高速客运机车。

采用轮轴空心轴传动的架承式悬挂如图 1-4 所

示。这种传动方式由套在轮轴外的空心轴及其两端的六连杆万向节组成。牵引电机是全悬挂，安装在转向架横向中心线上，小齿轮热套在电机转轴上，大齿轮通过滚动轴承装在空心轴的轴套上。电机产生的转矩

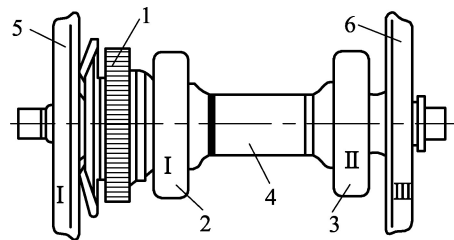


图 1-4 轮轴空心轴传动的架承式悬挂

1—大齿轮；2，3—万向节；4—轮轴空心轴；5，6—动轮

传递到大齿轮上后，由万向节 I 通过空心轴和万向节 II 传递给车轮 II，在经车轴传给车轮 I，驱动机车行驶。

这种传动装置结构复杂，但传递功率大，工作可靠。由于传动齿轮箱支承在转向架构架上，簧下质量显著减轻。轮轴空心轴传动方式适用于车速在 220 ~ 250 km/h 的高速客运机车。

个别传动的主要优点是当一台牵引电机发生故障时，可以单独切除，不会影响其他电机工作，同时充分利用了机车下部空间，所以它得到了广泛应用。但是，由于各轮轴间没有直接的机械联系，个别轮对容易空转，从而使机车的黏着牵引力降低。

2. 组合传动

组合传动就是每个转向架上只安装一台牵引电机（这种转向架称为单电机转向架），通过变速齿轮装置传动该转向架的每一根机车动轮轴。也就是一台转向架的各个轴组合在一起由一台牵引电机驱动，如图 1-5 所示。组合传动装置的结构比个别传动复杂，但由于组合传动有其特点而受到重视。干线电力机车随着铁路运输重载高速的不断发展，要求充分利用机车每一个轮对的黏着重量，以实现大的黏着牵引力，在这种情况下，就倾向采用组合传动。组合传动还有利于降低牵引电机单位功率的质量，因为组合传动相当于把几个轮对上的较小功率的牵引电机合并为一台大功率的电机，电机功率越大，其质量指标（即每 1 kW 功率的质量）越低，在相同容量下，电机造价也将降低。此外，采用组合传动还可以将传动齿轮进行不同的搭配来改变传动比，这样就可实现同一台机车既可成为高速客运机车，又可作为牵引力大的低速货运机车，从而使机车和牵引电机具有通用性。

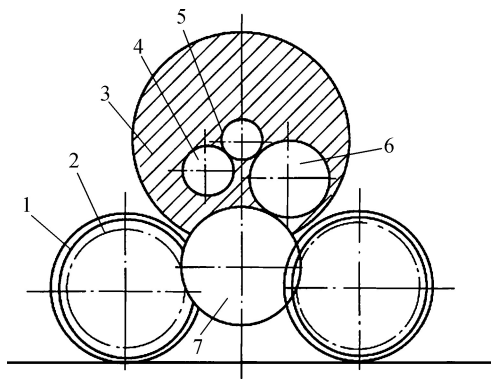


图 1-5 单电机两轴转向架组合传动

1—车轮；2—大齿轮；3—电机；4, 6—变速齿轮；
5—电机轴上小齿轮；7—中间齿轮

二、牵引电机的主要特点

直流和脉流牵引电机的工作原理和普通直流电机是一致的，其基本结构也是相似的。但是，牵引电机的工作条件与普通直流电机相比有很大区别，因此在选择牵引电机的设计、结构、材料、绝缘、工艺等方面都要慎重考虑。牵引电机工作的主要特点是：

1. 使用环境恶劣

牵引电机安装在车体下面，直接受到雨、雪、潮气的影响，机车运行中掀起的尘土也容易侵入电机内部。此外，由于季节和负载的变化，还经常受到温度和湿度变化的影响。因此，电机绝缘容易受潮、受污，对其性能和寿命产生极为不良的影响。所以，牵引电机的绝缘材料和绝缘结构应具有较好的防潮、防尘性能及良好的通风、散热条件。

2. 外形尺寸受限制

牵引电机悬挂在车体下面，其安装空间受到很大限制，轴向尺寸受轨距限制，径向尺寸受动轮直径的限制。为了获得尽可能大的功率，要求牵引电机结构必须紧凑，并采用较高等

级的绝缘材料和性能较好的导电、导磁材料。

3. 动力作用大

机车运行通过钢轨不平顺处（如钢轨接缝、道岔等）时，因撞击而产生的动力作用会传递给牵引电机，使牵引电机承受很大的冲击和振动。试验表明：当机车速度达到 120 km/h 时，抱轴式悬挂的牵引电机，垂直加速度可达 15g；横向加速度可达 7g；电枢表面的动力加速度可达 25g。这样大的动力作用常常造成牵引电机磁极螺栓松动、线圈连线断裂、零部件损坏等故障。同时，由于电刷的振动影响了电刷和换向器的正常接触，导致换向恶化。

当牵引电机采用架承式悬挂时，动力作用大大减小，试验证明其垂直加速度为 0.5g，横向加速度为 0.35g，这充分说明了采用架承式悬挂对发展高速铁路运输具有重要的意义。

4. 换向困难

直、脉流牵引电机换向困难的原因除了受机械动力方面的影响外，还有电气方面的原因，如牵引电机经常起动、制动，此时电流可达额定电流的两倍；当机车在长大坡上运行时，电机将长时间处于过电流状态；当机车高速运行时，采用深的磁场削弱使气隙磁场畸变增大；电网电压波动使电机端电压升高等，这些都将造成牵引电机换向困难。

脉流牵引电机的电流为脉动电流，除了直流分量外，还有一定的交流分量，电磁交流分量的存在将使电机换向更为困难，致使换向火花增大甚至引起环火。因此，在设计直、脉流牵引电机时，必须对换向问题予以特别注意。

5. 负载分配不均匀

牵引电机和普通电机的另一不同之处是：在同一机车上的数台牵引电机，不论在电的方面还是在机械方面都是连接在一起的。在电的方面，各电机之间是并联连接；在机械方面，各电机通过动轮与钢轨间的黏着作用而互相耦合在一起。因此，由于同一台机车上牵引电机特性有差异，各动轮直径不等或个别轮对发生“空转”“滑行”等原因，都有可能造成各电机负载分配不均，有的电机处于过载运行，有的电机处于欠载运行，从而使机车牵引力不能充分发挥。

三、牵引电机必须满足的要求

为了保证牵引电机在上述条件下可靠地工作，同时能适应机车运行的需要，牵引电机必须满足下列要求：

- (1) 应有足够大的起动牵引力和较高的过载能力。
- (2) 具有良好的调速性能。保证机车在不同的行驶条件下，有宽广的速度调节范围，并在速度变化范围内，能充分发挥牵引电机的功率。在正、反方向运行时，其特性尽可能相同。
- (3) 换向可靠。在大电流、高电压、高转速及磁场削弱条件下运行时，换向火花不应超过规定的火花等级。
- (4) 牵引电机各个部件应具有足够的机械强度，以保证电机在最恶劣的运行条件下可靠工作。
- (5) 牵引电机的绝缘必须具有很高的电气强度，并具有良好的防潮和耐热性能，以保证电机有足够的过载能力，并在其寿命期限内可靠工作。

(6) 牵引电机的结构应充分适应机车运行和检修的需要。如电机的传动与悬挂应使机车与钢轨间的动力作用尽量减小；对灰尘、潮气及雨雪的侵入有良好的防护作用；便于检修和更换电刷等。

(7) 必须尽可能地降低牵引电机单位容量的质量，使电磁材料和结构材料得以充分利用。

第二节 直流牵引电机的工作特性

牵引电机输出的机械转矩和转速是说明电机工作特性的两个重要物理量，电机的效率是衡量电机在实现能量转换过程中损耗大小的量。当电压和励磁电流恒定时，牵引电机的工作特性是指电机的转速 n 、转矩 T 、效率 η 与输出功率 P_2 之间的关系曲线，即 $n = f(P_2)$ ， $T = f(P_2)$ ， $\eta = f(P_2)$ 。在实际运行中，测量电枢电流 I_a 比测量 P_2 容易，且 I_a 随着 P_2 的增加而增加，所以工作特性也可表示为电枢电流的函数，即，即 $n = f(I_a)$ ， $T = f(I_a)$ ， $\eta = f(I_a)$ 。牵引电机的机械特性是指电机转速和电磁转矩之间的关系曲线，即 $n = f(T)$ 。

励磁方式不同的电机具有不同的特性。直流电机可分为他励、并励、串励和复励，他励电机特性和并励电机相同，因此只需分析并励、串励和复励三种电机的特性。

一、转速特性 $n = f(I_a)$

不论是哪一种励磁方式的直流电机，其转速对电枢电流的变化关系可根据直流电机电动势平衡方程式求得，即

$$U_N = E_a + I_a R_a = C_e \Phi n + I_a R_a \quad (1-1)$$

式中 U_N ——加在电机上的端电压, V;

I_a ——电枢电流, A;

R_a ——电枢回路电阻, Ω ;

Φ ——每极磁通, Wb;

C_e ——电机常数, 对于已制成的电机 C_e 为常数, 其值为

$$C_e = \frac{pN}{60a \times 10^6};$$

式中 p ——磁极对数;

N ——电枢绕组的总导体数;

a ——电枢绕组的并联支路对数。

由式 (1-1) 可解得

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-2)$$

从式 (1-2) 可以看出, 当 U 和励磁电流 I_f 都为常值

时, 影响电机转速的因素有两个: 一是电枢回路电阻压

降 $I_a R_a$; 二是磁通 Φ 。各种电机的转速特性如图 1-6 所示。

并励电机, 空载时 $P_2 = 0$, $I_a \approx 0$, 此时转速为空载转速 $n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi}$ 。随着 I_a 的增加, 电阻压降增加, 使转速趋于下降; 电枢反应的去磁作用使磁通略为减少, 又使转速趋于上升。由于两种因素对转速的影响可部分互相抵消, 所以电机转速变化很小。转速特性曲线可能是略为下垂, 也可能是略为上翘。实用上, 为保证电机稳定运行, 常使并励电机具有略为下降的转速特性 (曲线 1)。

空载转速 n_0 与额定转速 n_N 之差, 用额定转速的百分数表示, 称为电机的转速变化率 Δn , 即

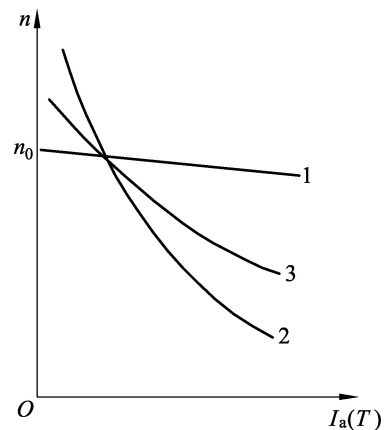


图 1-6 直流牵引电机的转速特性
1—并 (他) 励; 2—串励; 3—积复励