[轨道交通]

轨道交通车辆牵引电动机调速分析

文/浙江省机电技师学院　刘华桥　王　琪　姚月明　刘世泽

牵引电动机是轨道交通车辆的动力来源，对牵引电动机的调速直接关系到轨道交通车辆运行的稳定性、可靠度和舒适性，对其调速方法进行数学模型推导和机械特性分析，对比每种方法的优缺点，找出适合轨道交通车辆使用的调速方法，确保城市轨道交通车辆的平稳运行和运营安全。

轨道交通车辆在正常运行中需频繁起动、停止，对电动机的牵引要求特别高。而直流电动机具有良好的牵引和制动性能，其具备起动转矩大、过载能力强、调速性能好及控制电路简单等优点，可以实现平滑而经济的调速，如北京轨道交通1#线采用的牵引直流电动机。

直流电动机调速原理

对直流电动机调速指在负载不发生变化的情况下，人为改变直流电动机的某些参数以达到改变直流电动机稳定的转动速度，如图1所示，在负载T_L一定的情况下，直流电动机调速的机械特性在A点和B点之间的转速变化了Δn。

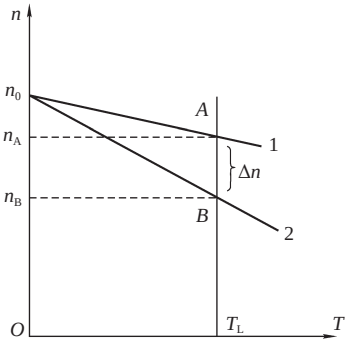

图1　直流电动机调速的机械特性

直流电动机转子的转动带动电枢绕组不停地切割由定子主极磁所产生的磁力线，因而在电枢绕组中产生感应电动势E_a，根据右手定则可判断感应电动势的方向，E_a的大小为

$$E_a = C_E \Phi n = U - I_a R_a \quad (1)$$

式中，C_E是电动势常数；Φ是磁通量；n是电动机的转速；U是电枢两端的电压；I_a是电枢中的电流；R_a是电枢绕组的电阻。

由式（1）可推导为直流电动机的转速公式为

$$n = E_a / (C_E \Phi) = (U - I_a R_a) / (C_E \Phi) \quad (2)$$

从转速公式可以看出直流电动机的调速方法有三种：①改变电枢绕组电路的阻值；②改变电枢绕组中的电压；③改变主磁极所产生的磁通。

一般调速方法分析

1．改变电枢绕组电路的阻值调速

（1）具体操作方法

一般在额定条件下（电源电压和励磁磁通保持不变），在转子电枢回路中串入不同阻值的电阻，即可改变电动机的转速，其机械特性变化如图2所示。

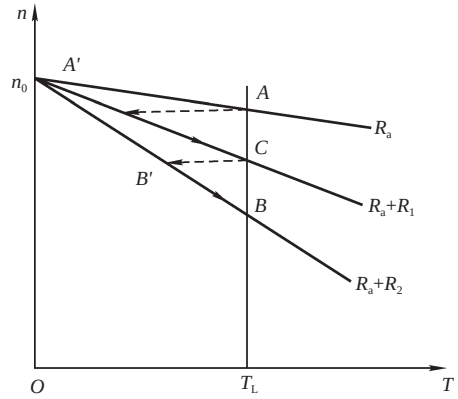

图2　改变电枢绕组电路的阻值调速的机械特性

（2）工作过程

图2中，A点是电枢绕组电路没有串接电阻时的额定工作点，A点对应的额定转速为n_N，电动机输出转矩为$T=T_L$；当一瞬间总R_a增大，在机械惯性的作用下，电动机的转速n和电枢电动势E_a不会突变，由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知，I_a会减小，则由$T=C_T\Phi I_a$得知输出转矩T会变小，因此机械特性由A点平移到A'，此时电动机的输出转矩$T<T_L$，转速n会下降，由$E_a=C_E\Phi n$得知E_a也会下降；由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知I_a会增大，输出转矩T也会随着增大，直到B点时$T=T_L$，电动机又恢复了转矩平衡，并以比n_N低的速度n_B平稳运行。使电动机的转速得到降低，若需要其转速再变慢一点，可再一次在电枢绕组电路中串接电阻R_C，电动机重复以上相同的过程后重新达到新的平稳$T=T_L$，其转速会降至n_C。

（3）特点

①在电枢绕组电路中串接电阻越多，电动机的转速越慢，则只能在n_N以下的范围内调速；②从图2看出，调速后机械特性变软，转速稳定性变差，负载越轻调速范围越小，实现无级调速困难；③因电阻上消耗大量电能，其功率损耗较大；④只需串入电阻就能实现调速，设备简单。这种调速方法适用于调速性能要求不高的中、小型电动机。

2．改变电枢绕组电路的电压调速

（1）具体操作方法

一般在额定条件（电枢绕组不串接电阻、励磁绕组磁通保持不变）下，改变电枢绕组电路的电压，即可改变电动机的转速，其机械特性变化如图3所示。

（2）工作过程

图3中，A点是电枢绕组电压没有改变时的额定工作点，A点对应的额定转速为n_N，电动机输出转矩为$T=T_L$；当在电枢回路电压U_a降低时，在U_a降低的一瞬间，在机械惯性的作用下，电动机的转速n和电枢电动势E_a不会突变，由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知，I_a会减小，则由$T=C_T\Phi I_a$得知输出转矩T会变小，因此机械特性由A点平移到A'，此时电动机的输出转矩$T<T_L$，转速n会下降，由$E_a=C_E\Phi n$得知E_a也会下降，由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知I_a会增大，输出转矩T也会随着增大，直到B点时$T=T_L$，电动机又恢复了转矩平衡，并以比n_N低的速度n_B平稳运行。使电动机的转速变慢，若需转速继续变慢，可再一次调低电枢回路电压U_a，电动机重复以上相同的过程后重新达到新的平稳$T=T_L$，其转速会降至n_C。

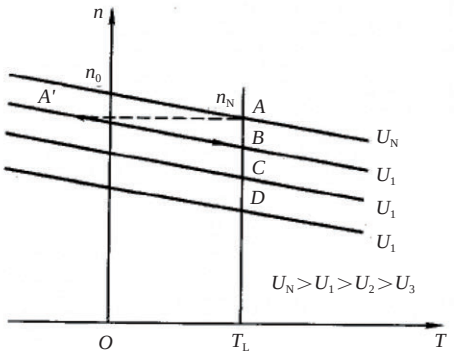

图3　改变电枢绕组电路的电压调速的机械特性

（3）特点

①因加在电枢绕组上的电压不能超过额定工作电压U_N，只能在额定工作电压U_N以下的范围内进行，则只能在n_N以下调速；②从图3看出，调速后机械特性硬度保持不变，电动机转速受负载转矩变化影响很小，稳定性好，可以实现平滑的、平稳的无级调速；③因无电阻消耗额外电能，其功率损耗比改变电枢绕组电路的阻值调速小很多，效率高；④需要有单独的电压可调的电源设备，该直流电源设备比较复杂，成本高。

3．改变主磁极磁通调速

（1）具体操作方法

一般在额定条件（电枢绕组不串接电阻、电枢电压也保持不变）下，改变励磁绕组电路的电压从而改变改变主磁极磁通 ，即可改变电动机的转速，其机械特性变化如图4所示。

（2）工作过程

在图4中，A点是励磁绕组电路没有改变时的额定工作点， A点对应的额定转速为n_0，电动机输

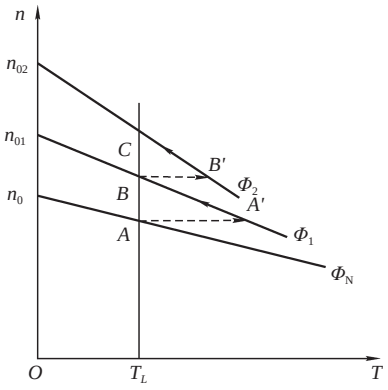

图4　改变主磁极磁通调速的机械特性

出转矩为$T=T_L$；当加在励磁绕组电路电压U降低时，主磁极磁通Φ会减弱，在Φ减弱的一瞬间→在机械惯性的作用下，电动机的转速n不会突变，由$E_a=C_e\Phi n$得知E_a会降低→由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知I_a会增大→则由$T=C\Phi I_a$得知输出转矩T会变大→因此机械特性由A点向右平移到A'→此时电动机的输出转矩$T>T_L$，转速n_0会上升，由$E_a=C_e\Phi n$得知E_a也会升高，由$I_a=(U-E_a)/R_a$得知此时此刻I_a会变小，输出转矩T也会随着变小，直到B点时$T=T_L$，电动机又恢复了转矩平衡，并以比n_0快的速度n_{01}平稳运行。使电动机的转速变快，若需要其转速再快一点，可再一次调低励磁绕组电压，电动机重复以上相同的过程后重新达到新的平稳$T=T_L$，其转速会升高至n_{02}。

（3）特点

①因加在励磁绕组电路上的电压不能超过额定工作电压U，只能在额定工作电压U以下的范围内进行磁通调节，励磁磁通越弱，电动机的转速越高，则只能在高于额定转速n_N以上的范围内调速；②从图4看出，经调速后机械特性变软，随着磁通Φ的减弱，机械特性变得更软，当磁通减弱相当多时，电动机运行将不稳定，所以转速不能升得太高，调速的范围不大；③因是对励磁绕组电路进行调节，所用设备容量小，因此损耗小；④控制方便，可实现无级调速，平滑性好。

轨道车辆直流牵引电动机调速方法

1．调压调速

城市轨道交通接触网普遍采用的是直流1 500 V或750 V，轨道车辆通过受电弓或受流器从接触网获取该直流电压，然后通过牵引主电路送到直流电动机上，调压调速就是指降低串励直流电动机的端电压来调速，具体技术措施有：斩波器调速、串电阻调速和绕组串并联调速。

（1）斩波器调压调速

在牵引直流电动机和直流电源之间串联斩波器，通过控制斩波器的导通比来调节斩波器输出的平均电压，此平均电压就是加在牵引直流电动机的端电压，从而改变电动机的转速。该调速是目前城市轨道交通中采用的方法。

根据计算斩波器输出的平均电压E_0的公式为

$$E_0=E(t_{on}/t)=\alpha E \qquad (3)$$

式中，t_{on}是导通时间；t是导通和关断时间之和即斩波周期；α是斩波器的导通比；E是直流电源电压。

从式（3）可看出改变导通比α的方法有：①在斩波器导通时间或关闭时间不变的情况下，改变斩波周期即频率调制；②在斩波器周期不变的情况下，改变斩波器的导通时间即脉冲宽度调制；③可同时改变波器导通时间和斩波周期即脉宽和频率调制。在城市轨道交通中一般选用脉冲宽度调制。

（2）串电阻调压调速

在牵引串励直流电动机和电源之间串接电阻，根据串联电阻分压的原理，改变电阻的阻值则可调节加在直流电动机上的端电压，从而实现对电动机的调速。此方法所用设备简单、控制方便，但电阻消耗大量的电能，造成能源浪费，经济效率差，电阻所产生的大量热量会使隧道温度上升，加大了隧道风机和轨道车辆空调的负载。在城市轨道交通车辆中一般不采用。

（3）绕组串并联调压调速

通过改变直流电动机绕组的连接方式来改变其阻值，从而改变加在直流电动机上的端电压来调速；由于绕组的连接方式只串并联两种，此方法只能有级调速，且会增加直流电动机绕组的复杂性，因此目前不采用此方法。

2．磁削调速

在轨道交通直流牵引系统中磁削调速指减弱主磁极所产生的磁通来调速。根据并联电阻分流的原理，在城市轨道交通中一般通过在直流牵引电动机的主磁极绕组两端并联电阻来减小其励磁电流，从而减弱主磁极磁通量，加快电动机的转速，即电阻分路调速法。其调速范围受限，但所用设备简单、能耗小、调节转速方便且维护方便等，在轨道交通车辆中用作辅助调速。EA

（收稿日期：2020.03.25）
（编辑：朱金凤）