

# 第一章 电力机车速度调节

电力机车作为电气化铁道的牵引动力，为充分发挥其功率，提高运输能力，要求机车的牵引力和速度能在宽广的范围内均匀而经济地调节。本章着重学习机车的速度调节，分析机车的调速控制。通过本章学习，应达到以下目标：

- (1) 了解整流电流脉动对牵引电动机的影响及其减小措施。
- (2) 熟悉直传动电力机车的调速方法，会分析三段不等分桥顺序调压。
- (3) 熟悉相控机车磁场削弱方法及其应用，会分析无级磁场削弱。
- (4) 掌握提高电力机车功率因数的方法。
- (5) 掌握交流传动电力机车的调速方法和调速特性。

## 第一节 概述

机车调速是指人为地改变牵引电动机的工作参数使其速度发生变化的运行过程，它有别于因外部扰动（网压变化、线路纵断面变化等）引起的转速变化。

### 一、机车的运行状态

一般情况下机车牵引列车的整个过程是由停车状态开始，经过起动加速再逐渐提高速度，直到机车工作在其自然特性上，此后司机根据列车运行图的要求及线路纵断面的变化随时进行速度调节。进站停车前进行制动，降低机车速度，直至最后停车。列车的整个运行过程，情况虽然很复杂，但概括起来，却只存在起动、调速、制动 3 种基本的运行状态。这 3 种基本运行状态，其实质都是速度的调节，起动和制动是调速的两种特殊形式。因此，机车速度调节是牵引列车运行时最为根本的任务之一，也是完成运输任务的主要手段之一。

## 二、电力机车调速的本质

电力机车是以牵引电动机作为传动设备的，其调速本质是牵引电动机转速的调节。电力机车的类型不同、选用牵引电动机的类型不同，其调速的方式就不同，而调速方式又会影响机车的牵引性能和功率因数。

直-直型和交-直型电力机车采用直流（脉流）牵引电动机作为驱动电机，其调速实质是对直流电动机进行调速。

交-直-交型电力机车采用三相异步牵引电动机作为驱动电机，其调速实质是对三相异步电动机进行调速。

## 三、电力机车调速的基本要求

电力机车无论采用何种调速方式，从运行安全的角度出发，必须满足以下要求：

(1) 宽广的调速范围。只有具备宽广的调速范围才能满足列车运行速度不断提高的

需要。

(2) 冲击力小，牵引力变化连续。速度调节应力求平稳，不间断牵引电动机的供电，并且有尽可能多的速度运行级，从而避免电流和牵引力的冲击。

(3) 调速经济。在保证速度范围的情况下，附加设备要少，且尽量减少附加能量损耗。

(4) 运行可靠，控制简单，操作方便。

## 第二节 直流传动电力机车的调速

### 一、直流传动电力机车速度表达式

直流传动（包括直-直型和交-直型）电力机车选用直流（脉流）牵引电动机作为牵引动力，其转速表达式为：

$$n = \frac{U_d - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1.1)$$

式中  $U_d$ ——牵引电动机端电压（V）；

$I_a$ ——牵引电动机电枢电流（A）；

$\Phi$ ——牵引电动机每极磁通（Wb）；

$R_a$ ——牵引电动机电枢电阻（ $\Omega$ ）；

$C_e$ ——电动势常数。

机车动轮周线速度与电动机转速的关系为：

$$v = \frac{\pi D}{60\mu_c} n \quad (\text{m/s})$$

将电动机的转速  $n$  换算为机车的运行速度  $v$ ，可推导出机车速度计算式为：

$$v = \frac{60\pi D}{1000\mu_c} \cdot \frac{U_d - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U_d - I_a R_a}{C_v \Phi} \quad (\text{km/h}) \quad (1.2)$$

式中  $C_v$ ——机车速度常数， $C_v = 1000C_e\mu_c / 60\pi D$ ；

$D$ ——机车动轮直径 ( m )；

$\mu_c$ ——机车齿轮传动比。

## 二、交-直型电力机车调速方法

根据公式 ( 1.2 ) 可知交-直型电力机车的调速方案应有以下几种：

### 1. 改变牵引电动机电枢回路电阻

在牵引电动机电枢回路中串入启动调压电阻，通过改变电阻阻值来调节机车的速度。由于牵引电动机回路电压较高，电流较大，附加调节电阻的损耗会使牵引电动机效率降低，调速不经济，并且启动调压电阻本身分段，在调速过程中会造成机车牵引力有冲击。因此，在机车上并不采用这种调速方法。

### 2. 改变牵引电动机的端电压

现代直流电力机车如城轨电动列车、无轨电车，利用斩波的原理可以对牵引电动机的端电压进行连续、平滑的调节，实现调压调速。

在交-直型电力机车上，接触网电压需经牵引变压器降压和整流装置整流后，再供给牵引电动机。若调压在变压器环节，可通过改变变压器一次侧或二次侧绕组的匝数进行调压，称

为变压器有级调压，国产 SS<sub>1</sub> 型电力机车就采用低压侧有级调压方式；若调压在整流环节，利用晶闸管整流元件，通过改变晶闸管移相角调节整流输出电压，从而进行平滑无级调速，称为相控调压。国产交-直型电力机车除 SS<sub>1</sub>、SS<sub>2</sub> 和 SS<sub>3</sub> 机车外均采用相控调压。

### 3. 改变磁通量

如果保持牵引电动机的端电压不变，则机车的速度随着磁通的减弱而提高，即所谓的磁场削弱调速（详见本章第三节励磁调节）。

交-直型电力机车，以调压调速为主，弱磁调速为辅。机车在额定速度以下采用调压调速，在额定速度以上采用磁场削弱调速。无论调节电压或调节磁通量，都不会产生附加的能量损耗，因而得到的速度级称为经济运行级。机车在经济运行级上可以长时间运行。

## 第三节 励磁调节

所谓励磁调节，就是通过调节流过牵引电动机的励磁电流，从而改变牵引电动机的主极磁通，达到调速的目的，亦称磁场削弱调速。一般情况下，要进行磁场削弱调速，必须是在牵引电动机端电压已达到额定电压，而牵引电动机电流比额定值小时实施。磁场削弱的目的是扩大机车的速度运行范围，充分利用机车功率。

### 一、磁场削弱系数

磁场削弱系数用  $\beta$  表示，其定义是：在同一牵引电动机电枢电流下，磁场削弱后（削弱磁场）牵引电动机主极磁势与磁场削弱前（满磁场）牵引电动机主极磁势之比。其表达

式为：

$$\beta = \frac{(IW)_{\beta}}{(IW)_m} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中  $(IW)_{\beta}$  —— 磁场削弱后主极磁势 (安·匝)；

$(IW)_m$  —— 磁场削弱前 (满磁场) 主极磁势 (安·匝)。

磁场削弱系数表明牵引电动机主极磁势削弱的程度。 $\beta$  越小，表明磁场削弱越深。当电动机磁路不饱和时，可以用磁通代替磁势。

## 二、磁场削弱方法

交-直型电力机车采用保持励磁绕组匝数不变，通过对励磁绕组分流，使牵引电动机电枢电流中的一部分流过励磁绕组，以实现磁场削弱。

### 1. 电阻分路法

在励磁绕组的两端并联电阻对励磁电流进行分路，从而达到削弱磁场的目的，如图 1.1 所示。电阻分路法的磁通不能连续变化，适用于交-直型货运电力机车。磁场削弱系数的表达式为：

$$\beta = \frac{(IW)_{\beta}}{(IW)_m} = \frac{I_L W}{I_a W} = \frac{I_L}{I_a} = \frac{I_L}{I_L + I_R} = \frac{R_1}{R_1 + R} \quad (1.4)$$

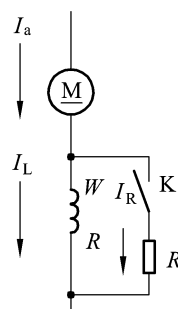


图 1.1 电阻分路法原理

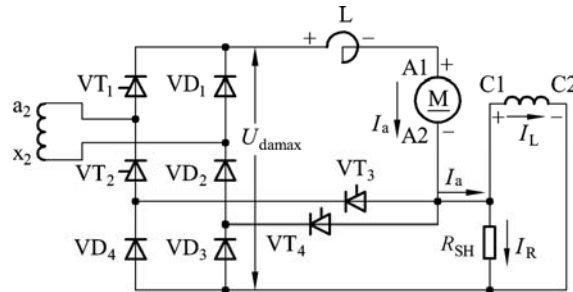
式 (1.4) 表明，磁场削弱系数  $\beta$  取决于励磁绕组与分流电阻

的阻值大小，而与电机励磁绕组匝数无关。要改变磁场削弱系数，只需改变分路电阻的大小。

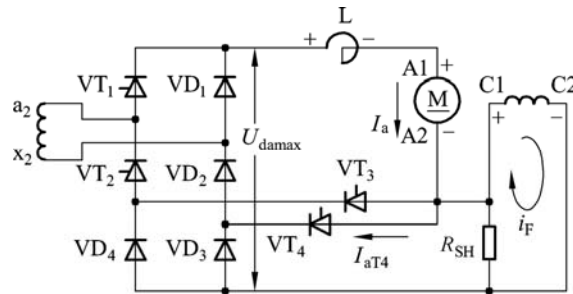
为了降低磁场削弱时的电流冲击和牵引力冲击，避免分路电阻过多造成的控制线路复杂，附加设备增多，一般磁场削弱取三级左右。

### 2. 晶闸管分路法

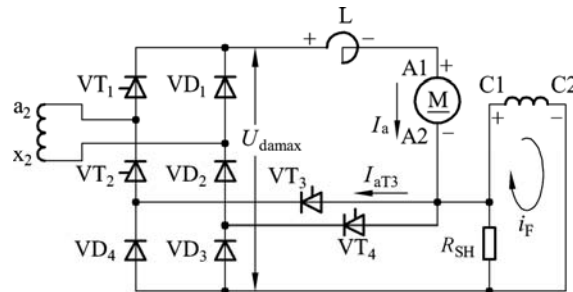
晶闸管分路法是利用晶闸管元件的连续、实时、可控，对牵引电动机的励磁电流进行旁路，从而达到削弱磁场的目的，这种方法也称无级磁场削弱法，适用于交-直型客运电力机车，其原理如图 1.2 所示。



( a ) 满磁场时的电路



( b ) 磁场削弱正半周时的电路



( c ) 磁场削弱负半周时的电路

图 1.2 晶闸管分路法原理图

图中  $a_2x_2$  为变压器二次侧绕组，晶闸管  $VT_1$ 、 $VT_2$  和二极管  $VD_1 \sim VD_4$  构成半控桥整流电路， $VT_3$ 、 $VT_4$  为分路晶闸管， $L$  为平波电抗器， $C_1C_2$  为牵引电动机  $M$  的励磁绕组， $A_1A_2$

为牵引电动机 M 的电枢绕组， $R_{SH}$  为固定分路电阻，以交流电压一个周波为例，分析其工作原理：

图 ( a ) 为满磁场，半控桥满开放时的工作情况。正半周  $a_2$  为高电位时，半控桥 VT<sub>1</sub>、VD<sub>3</sub>、VD<sub>2</sub> 导通；负半周  $x_2$  为高电位时，半控桥 VD<sub>1</sub>、VD<sub>4</sub>、VT<sub>2</sub> 导通。分路晶闸管 VT<sub>3</sub>、VT<sub>4</sub> 由于未触发，故均不参与工作。此时，半控桥整流输出的电压全部施加在平波电抗器 L、牵引电动机的电枢绕组 A1A2、励磁绕组 C1C2 上。

图 ( b )、( c ) 为半控桥满开放、磁场削弱时的工作情况。正半周  $a_2$  为高电位时，图 ( b ) 半控桥仍为 VT<sub>1</sub>、VD<sub>3</sub>、VD<sub>2</sub> 导通，分路晶闸管 VT<sub>4</sub> 在  $\omega t = \alpha$  时刻触发，由于 VT<sub>4</sub> 加有正向电压，其值等于励磁绕组 C1C2 两端的电压，故触发 VT<sub>4</sub> 导通。而半控桥中的二极管 VD<sub>3</sub> 由于 VT<sub>4</sub> 的导通而承受反向电压迅速截止。当  $\omega t = \alpha \sim \pi$  时，VT<sub>4</sub> 一直导通，导通角为  $\theta$ 。此时，电枢电流  $I_a$  经分路晶闸管 VT<sub>4</sub>，半控桥的 VD<sub>2</sub>、VT<sub>1</sub>，变压器二次侧绕组  $a_2x_2$  构成回路。电枢电流  $I_a$  不经过励磁绕组 C1C2 和固定分路电阻  $R_{SH}$ 。励磁电流  $i_F$  仅靠励磁绕组中的电感作用与固定分路电阻  $R_{SH}$  构成最小电阻回路。

负半周  $x_2$  为高电位时，图 ( c ) 由于半控桥工作在满开放状态，所以当  $\omega t = \pi$  时，触发 VT<sub>2</sub>，VD<sub>1</sub>、VD<sub>4</sub>、VT<sub>2</sub> 导通，VT<sub>1</sub>、VD<sub>2</sub> 自然关断。当  $\omega t = \pi + \alpha$  时，VT<sub>3</sub> 触发导通，VT<sub>4</sub> 关断，当  $\omega t = (\pi + \alpha) \sim 2\pi$  时，电枢电流  $I_a$  经 VT<sub>3</sub> 短路，励磁绕组仍与固定分路电阻  $R_{SH}$  自成最小电阻回路。此时磁场削弱系数为：

$$\beta = \frac{(IW)_{\beta}}{(IW)_m} = \frac{W(\pi - \theta)I_a}{W\pi I_a} = \frac{\pi - \theta}{\pi} = \frac{\alpha}{\pi} \quad (\alpha \neq 0) \quad (1.5)$$

式 ( 1.5 ) 说明只要调节分路晶闸管的控制角  $\alpha$  就可以连续调节磁场分路，由于分路晶闸



管  $VT_3$ 、 $VT_4$  是靠电源电压过零点自然换相，为了获得磁场削弱系数，要求半控桥必须满开放工作。

### 三、磁场削弱的应用

当牵引电动机由满磁场运行转换为磁场削弱运行时，这个过程是很短暂的。此时，机车由于巨大的惯性，速度来不及变化，因此磁场削弱后电机的反电势减小，电枢电流增加，机车的输出功率和牵引力均有所提高。此时，若列车运行阻力不变，则机车牵引力不变，机车速度便可提高，故在平直道实施磁场削弱可提高运行速度。若在上坡道实施磁场削弱，可增大机车牵引力，保持牵引速度不变，即所谓的恒速爬坡。

使用励磁调节的方法调节机车速度，是以牵引电动机主极磁场的减少来获得机车高速运行的，并且磁场削弱越深，机车的速度越高。但是磁场削弱深度是有限的，否则由于牵引电动机主极磁场过分削弱，在大电流、高速运行情况下会使牵引电动机换向恶化，容易发生牵引电机环火。故一般情况下脉流牵引电机的最小磁场削弱系数  $\beta_{\min}$  为  $0.35 \sim 0.40$ 。实用值  $44\% \sim 50\%$ ，保留一定的裕量。