

前 言

本书为日本交友社出版的电力机车牵引理论基础知识的普及读物，在日本已第11次印刷出版，对培训电力机车乘务人员的工作起了一定的推动作用。

本书的特点是，由浅入深，由表及里地论述了电力机车的牵引理论。书中从电力机车牵引电动机的特性开始讲起，并以此作为学习电力机车操纵技术的基础。然后，用较大篇幅介绍了电力机车的牵引特性、牵引力和机车的调速方法等，使乘务人员学习后能够用最经济的方法操纵电力机车。

书中还对列车运行中的有关问题，结合电力机车的特点进行了介绍。如列车运行和重量及牵引力的关系；运行速度和时间；列车停车、减速的制动距离和制动时间的计算等。

日本铁路电气化已有多年的历史，电气化铁路已达一万多公里，他们的电力机车运行理论对我国会有借鉴之处。我们翻译此书，以期弥补我国电气化铁路方面教材之不足，对电力机车人员培训略尽微薄之力。

由于日本铁路电力机车类型和管理制度与我国不尽相同，译文对原文中有关运转规程部分及部分电力机车牵引特性曲线图予以从略。

译者

1984年

内 容 简 介

本书以电力机车牵引电动机特性为基础，介绍电力机车牵引特性；牵引力和机车调速；列车运行、重量、牵引力的关系，并介绍了运行速度和时间；以及制动距离和时间的计算。

本书可作电力机车乘务人员培训教材和技术人员学习参考。

運 転 理 論

(直流電気機関車)
(交流)

交友社・1981年

★

电力机车牵引

〔日〕交友社 编

张贵珍 杨宾华 译

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 赵世涵 封面设计 刘景山

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：6.125 字数：139千

· 1985年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—1,500册 定价：1.20元

目 录

第一章 概要	1
一、直流串励电动机的特性	1
第二章 牵引电动机的特性曲线	8
一、转速的求法	8
二、效率的求法	8
三、转矩的求法	10
四、调节励磁时牵引电动机转速的求法	18
五、牵引电动机的定额	30
第三章 齿轮装置	33
一、传动比	33
二、牵引电动机特性和机车特性	35
第四章 电力机车特性曲线	39
一、特性曲线的求法	39
二、特性曲线的用法	43
三、电力机车特性曲线的变化	44
四、调速方法	49
第五章 电力机车牵引特性曲线	68
一、牵引特性曲线的求法	68
二、级位数及其电阻值的确定	83
第六章 电力机车牵引力	88
一、起动牵引力	88
二、特性牵引力	89
三、粘着牵引力	89

第七章 列车阻力	92
一、起动阻力	93
二、运行阻力	96
三、坡道阻力	100
四、曲线阻力	101
五、隧道附加空气阻力	103
第八章 列车制动	107
一、制动术语	107
二、闸瓦压力	108
三、根据列车管减压量计算制动缸压力	110
四、列车管压力和制动缸最大压力的关系	114
五、制动缸压力和闸瓦压力的关系	115
六、制动倍率	115
七、制动缸鞣鞣行程与闸瓦压力的关系	118
八、基础制动装置的效率	119
九、制动率与闸瓦压力及纯闸瓦压力的关系	119
十、列车制动率	122
十一、制动力和摩擦系数	122
十二、制动力和滑行	126
十三、制动距离和制动时间	127
第九章 机车牵引定数	135
一、什么是牵引定数	135
二、牵引重量	136
三、均衡速度	138
四、牵引重量曲线的用法	138
五、限制坡道、加算限制坡道	141
六、假想坡道	141
七、列车速度类别 (略)	142

八、查定牵引定数规程摘要 (略)	142
第十章 运行时间及所需电能	143
一、加速和减速	143
二、加速力曲线的制作方法	146
三、速度距离曲线的绘制方法	151
四、时间距离曲线的绘制方法	157
五、时间尺的制作方法	157
六、制动曲线的绘制方法	159
七、运行图的画法	161
八、运行图画法和运行时间查定标准	166
九、关于列车长度速度曲线的画法	169
十、电能曲线的绘制方法	170
第十一章 电力机车的调速	174
一、由波形因数认识经济调速	175
二、加速度的影响	176
三、电力机车的加速调节法	177
四、电力机车的运行方法	178
五、减速度的影响	179
第十二章 其 它	180
一、轴重补偿法	180
二、空转检测及再粘着方法	185
三、励磁调节时牵引电动机的转矩	186

第一章 概 要

机车的操纵虽以列车运行的安全、正点以及迅速为主，但也必须考虑列车运行的经济性。为此，熟知机车的构造和作用是很必要的。当操纵电力机车时，不仅应记住机车的牵引力、客货车的重量、列车的阻力以及列车的制动等，还必须掌握合理地、经济地操纵列车的技术。电力机车一般采用直流串励电动机，通过齿轮和动轮直接耦合以牵引列车。本书以牵引电动机特性作为学习机车操纵技术的基础，从而达到最经济地、更好地操纵列车的目的。

一、直流串励电动机的特性

所有机车，在其功用之外还有独特的性质，这个独特的性质叫做机车特性。电力机车采用的电动机，一般是直流串励电动机，因而电力机车的特性，无疑是指直流串励电动机的特性。把这个特性用图表示出来就叫做特性曲线，通常称为电动机的特性曲线。它是根据转矩和电流，转速和电流，效率和电流求出的。由所求得特性曲线可以了解电动机的性质，对掌握列车重量以最佳方法操纵机车有着重要关系。

（一）牵引电动机的转速

给牵引电动机加上电压，电动机即旋转。电枢绕组在磁场内旋转而切割磁力线，根据电磁感应定律而产生电动势。

因为该电动势的方向与在电枢绕组内流过的电流方向相反，所以把该电动势叫做反电动势。该反电动势不象作为发电机时从外部供给，而是对供给电动机的电流起一种阻抗作

用。因此，不从外部加上一个克服反电动势的电压，电流便不能流过。

求反电动势的方法与发电机中反电势的求法完全相同。

若设：

E_c ——反电动势 (V)；

p ——主磁极数；

a ——电枢绕组并联支路数；

Z ——电枢导体总数；

Φ ——每极磁通数 (Wb)；

n ——电枢转速 (r/min)。

则电枢绕组的一根导体每秒旋转一周，切割磁力线的总数为 $p \times \Phi$ 。

因此，若电枢绕组每根导体每分钟旋转 n 转，则每秒切割磁力线为

$$p \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60}$$

如果电枢绕组的导体总数为 Z ，并联支路数为 a ，每条并联支路的导体数为 Z/a ，则

$$E_c = p \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{Z}{a} = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi n Z}{60} \quad (\text{V})$$

(1-1)

对于成品电动机，上式中

$$\frac{p}{a} \cdot \frac{Z}{60}$$

是一个常数，若假定此常数为

$$\frac{p}{a} \cdot \frac{Z}{60} = K$$

则

$$E_c = K \Phi n \quad (\text{V}) \quad (1-2)$$

如式 (1-2) 所示，反电动势与每极磁通和转速的乘积成正比。

若设:

E_t ——电动机端电压 (V) ;

I_a ——电动机电枢电流 (A) ;

r ——电动机内阻 (Ω) 。

根据克希霍夫第二定律得

$$E_t = E_c + I_a r \quad (\text{V})$$

$$\text{或} \quad E_c = E_t - I_a r \quad (\text{V}) \quad (1-3)$$

可见, 电动机的端电压为反电动势 E_c 和电动机内阻的电压降 $I_a r$ 所抵消。

根据式 (1-2) 和式 (1-3), 电枢的转速 n 为

$$n = \frac{E_c}{K\Phi} = \frac{E_t - I_a r}{K\Phi} \quad (\text{r/min}) \quad (1-4)$$

由此可知, 电枢的转速 n 与反电动势成正比, 与每极的磁通成反比。

式 (1-4) 中, 牵引电动机电枢绕组的电阻 r 的值很小, 例如 MT43 型牵引电动机的总内阻为 0.0498Ω 、MT100 型为 0.0313Ω 、MT52 型为 0.0557Ω , 因而内阻上的电压降 $I_a r$ 通常可以忽略不计。

因此式 (1-3) 中, 可以认为端电压 E_t 和反电动势 E_c 近似相等, 即

$$E_c \approx E_t \quad (\text{V})$$

这样式 (1-4) 变为

$$n = \frac{E_t}{K\Phi} \quad (\text{r/min}) \quad (1-5)$$

当磁极到达饱和点以前, 每极磁通 Φ 与电流成比例地增加, 过了饱和点, 磁通大致保持不变。实际上电动机的磁场饱和点不甚明确, 通常可以认为磁极的饱和点约在额定电流的 1.5 倍以上, 因此磁极的使用范围是处于未饱和部分。

因为牵引电动机是串励，当电枢电流 I_a 与磁通 Φ 成正比时，式（1—5）的转速 n 为

$$n \propto \frac{E_a}{I_a} \quad (\text{r/min}) \quad (1-6)$$

从式（1—6）可知，在端电压 E_a 一定时，若转速 n 增加，电动机的电枢电流 I_a 减少；若电枢电流增加，则转速降低。

（二）电动机的转矩

一般，使物体旋转的力，以作用于该物体的力偶来度量。作用力的大小和回转轴至力的作用方向所做垂线长度的乘积，称为旋转力或转矩。

因此，电动机的转矩是磁场和流过电枢绕组的电流相互作用所产生的机械力（即在电枢绕组上产生的力）和电枢半径乘积的总和。成品电动机的转矩与磁场强度以及流过电枢绕组的电流的大小有关。则电磁力 F 为

$$F = Bli \quad (\text{N}) \quad (1-7)$$

电枢表面的平均磁通密度 B 为

$$B = \frac{p\Phi}{\pi dl} \quad (\text{Wb/m}^2) \quad (1-8)$$

式中 F ——每根电枢导体所受的力（N），
 B ——磁通密度（Wb/m²），
 l ——每根电枢导体的长度（m），
 i ——每根电枢导体流过的电流（A），
 Φ ——每个磁极的磁通（Wb），
 n ——主磁极数，
 d ——电枢的直径（m），
 Z ——电枢导体总数。

上式中 $p\Phi$ 是总磁通量， πdl 表示电枢圆周面积，代入式

(1-7) 得

$$F = \frac{p\Phi}{\pi dl} \cdot li = \frac{p\Phi i}{\pi d} \quad (\text{N}) \quad (1-9)$$

若设:

a —— 电枢绕组的并联回路数;

I_a —— 流过电枢绕组的总电流 (A)。

则
$$i = \frac{I_a}{a} \quad (\text{A}) \quad (1-10)$$

代入式 (1-9) 得

$$F = \frac{p\Phi}{\pi d} \cdot \frac{I_a}{a} \quad (\text{N}) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 是电枢每根导体所受的力。

因此, 设 τ 为电枢的转矩

$$\begin{aligned} \tau &= F \cdot \frac{d}{2} \cdot Z = \frac{p\Phi}{\pi d} \cdot \frac{I_a}{a} \cdot \frac{d}{2} \cdot Z \\ &= \frac{pZ\Phi I_a}{2\pi a} \quad (\text{N}\cdot\text{m}) \end{aligned} \quad (1-12)$$

对于成品电动机, 上式中 $\frac{pZ}{2\pi a}$ 是一个常数, 设为 K_1 ,

则

$$\tau = K_1 \Phi I_a \quad (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (1-13)$$

所以, 电动机的转矩与电枢电流和磁场产生的磁通的乘积成比例。

这个结果很重要, 它是一个不仅用于直流电动机, 也可用于各种交流电动机的基本公式。

串励电动机在磁路饱和以前, 磁通 Φ 随电动机电枢电流 I_a 变化, 即有如下关系

$$\Phi = K_2 I_a \quad (\text{A})$$

代入式 (1-13) 得

$$\tau = K_1 I_a K_2 I_a = K_3 I_a^2 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (1-14)$$

这说明磁极饱和以前直流串励电动机的转矩和电流的平方成正比。因此很小的电流的变化就可使转矩发生很大变化，此转矩与电压无关，由电流决定。这是直流串励电动机适用于机车的一项重要因素。

转矩的实用单位是 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ，其与米·公斤·秒单位制的关系为

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$$

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

因此，以 $\text{N} \cdot \text{m}$ 为单位的转矩换算成 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 时需除以9.8，因而由式(1-12)得

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{p \Phi I_a Z}{2 \pi a} \times \frac{1}{9.8} = 0.01625 \frac{p}{a} Z \Phi I_a \\ &= K_4 \Phi I_a \text{ (kgf} \cdot \text{m)} \end{aligned} \quad (1-13')$$

其中 $K_4 = 0.01625 \frac{p}{a} Z$

因此以下均以以下式表示转矩

$$\tau = K \Phi I_a \text{ (kgf} \cdot \text{m)} \quad (1-15)$$

(三) 转矩和电动机输入功率

即便是相同的电动机，当为并励时，按照式(1-15)转矩与电枢电流成正比即

$$\tau \propto I_a$$

若为串励时

$$\tau \propto I_a^2$$

$$\sqrt{\tau} \propto I_a$$

即转矩与电流的平方成正比。当电压一定时，并励电动

* 译者注：按1984年2月27日国务院公布的《中华人民共和国法定计量单位》，转矩的单位应是 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

机的功率为

$$P = E_a I_a \propto \tau$$

即功率 P 与转矩 τ 成正比。串励电动机转矩与电流的关系如前所述, 即

$$P = E_a I_a \propto \sqrt{\tau} \quad (1-16)$$

由此可知, 在一般运行范围内, 串励电动机与其他电动机相比, 转矩变化大, 功率的变化较少。这样, 变电所负荷的变动就少, 这就意味着使用电力的经济性, 是一项重要问题。

第二章 牵引电动机的特性曲线

在牵引电动机上施加规定电压的工况下，计算出各电流值的转速和转矩，再与试验台上的试验结果进行比较以确定适当的数值，并求出相对于输入的输出效率，将这些数值以电流为基准在图表上表示的曲线称为牵引电动机的特性曲线。

一般，牵引电动机特性曲线的表示方法为，在图表的横坐标上取电流值，在纵坐标上表示转速、转矩及效率。对该转速、转矩、效率分为满磁场特性和削弱磁场特性两种。

牵引电动机特性曲线是作运输计划的基本图表，由特性曲线不但能了解电动机的转速、转矩及效率，而且它还是电力机车特性曲线和牵引曲线以及运行图和电量图绘制的基础。牵引电动机特性曲线按下述方法求出。

一、转速的求法

牵引电动机的转速是用试验装置实测出来的一分钟的转数。实测时，电机端加规定电压，在负荷变化情况下，用转数表测量各种电流值时的转速。

二、效率的求法

在牵引电动机上施加规定电压，当电流流过时电动机作功，但是与所供电力成正比的一部分电能，未转变为任何机械能，而变为热量损失掉。也就是说，电动机转轴的输出功率是从输入功率中扣除了这部分损失留下的那部分。这时，

输入与输出之比即为电动机的效率，一般以百分率表示并按下式计算

$$\eta = \frac{E_1 I - P_L}{E_1 I} \times 100(\%) \quad (2-1)$$

式中 η ——牵引电动机效率(%)；

E_1 ——牵引电动机端电压(V)；

I ——牵引电动机电流(A)；

P_L ——牵引电动机损耗(W)。

电动机的损耗如下所述：

(一) 铁损耗

铁损耗包括磁滞损耗和涡流损耗两部分。所谓磁滞损耗就是当电枢铁芯在磁通中转动时，转动铁芯中磁化的方向交变，由铁芯磁化的惯性产生的损耗，它与〔转速×(平均磁通密度)²〕成正比。

涡流损耗是电枢铁芯在磁通中转动时，由铁芯中的涡流产生的损耗，它与〔(转速)²×(铁板厚度)×(平均磁通密度)²〕成正比。

这两种损耗，由于电枢铁芯材质和厚度不同，叠片绝缘的不良，以及工作方法等差异很大，用计算方法求这些损耗比较困难，所以一般采用实测方法求出。

(二) 铜损耗

铜损耗也称电损耗，当电流流过有电阻的回路时将产生 $I^2 R$ 损耗。如果仔细地区分一下电动机中的铜损耗，又分为：

1. 电枢绕组中产生的铜损耗；
2. 励磁绕组中产生的铜损耗；
3. 电刷电阻损耗（这种损耗是电刷的电阻损耗及电刷与整流子的接触电阻产生的损耗）。

(三) 机械损耗

电机轴承的摩擦损耗、电刷的摩擦损耗、转动部分与空气的摩擦损耗（通风损耗）等总称为机械损耗。

机械损耗随转速的增高而增大，用计算方法求它很困难，一般情况也用实验方法求出。机械损耗一般为额定容量的0.5~3.0%。

(四) 杂散损耗

杂散损耗是由于负荷变化而产生的一种变化不规则的损耗。包括因电枢齿槽的影响在磁极表面产生的铁损耗；电枢反应造成磁场畸变而引起的损耗；电枢导体切割磁通的变化而产生的涡流损耗等。这种损耗与其他损耗相比所占比例很小，仅为输出的1%。以上各种损耗，几乎均变为热量使电动机自身的温度升高而削弱其性能。

图2—1所示为MT41型牵引电动机损耗量的损耗曲线。一般电力机车用直流串励电动机为变磁通型（负荷变化磁通变化很大），其损耗因电机负荷或列车速度的变化而不同。可把低速或起动时的效率作为牵引电动机的计算效率。当电机转速逐渐增加而电流减少时效率反而不减，但转速进一步增加而电流变得很小时，效率呈急聚下降的趋势。

三、转矩的求法

一般，已知牵引电动机的输出和转速时，电动机产生的转矩按下式计算

$$\tau = 0.975 \times \frac{E_t I_a}{n} \eta \quad (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad (2-2)$$

式中 τ ——牵引电动机转矩 (kgf·m)；

E_t ——牵引电动机端电压 (V)；

I_a ——牵引电动机电枢电流 (A)；

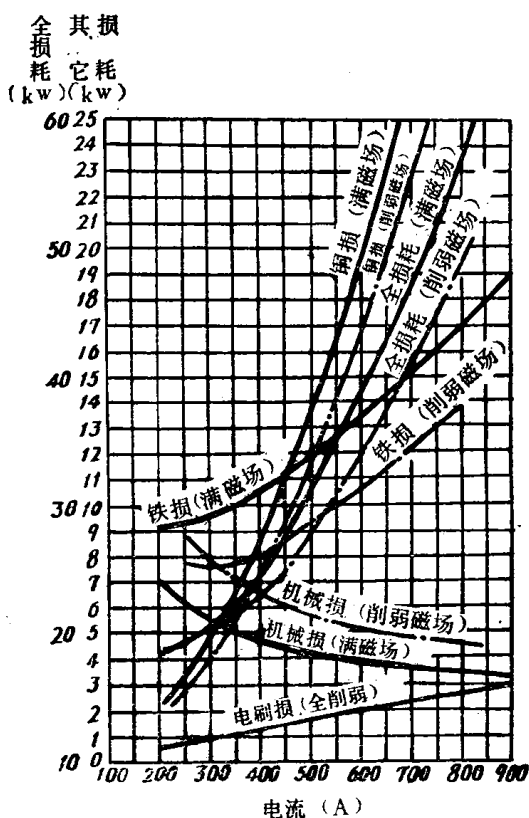


图 2—1 MT41型牵引电动机损耗曲线

η ——牵引电动机效率;

n ——牵引电动机转速 (r/min)。

对 (2—2) 式说明如下: 当电流流过电动机时, 电枢导体在一定方向受到力的作用。这些导体在电枢四周产生合力 F , 合力 F 产生的转矩为电枢轴中心至电枢圆周距离的乘积。设 F 为电枢的转动动力, d 为电枢直径。因为转矩

$$\tau = F \times \frac{d}{2} \text{ (kgf} \cdot \text{m)}$$

所以

$$2\tau = Fd \text{ (kgf}\cdot\text{m)}$$

$$F = \frac{2}{d}\tau \text{ (kgf)} \quad (2-3)$$

因此，电枢每转一转电动机所做的功为电枢周长与力 F 的乘积，即

$$\pi d F \text{ (kgf}\cdot\text{m)}$$

把 (2-3) 式代入上式，得

$$\pi d F = \pi d \times \frac{2}{d}\tau = 2\pi\tau \text{ (kgf}\cdot\text{m)} \quad (2-4)$$

所以，当电枢每分钟的转速为 n 时，电动机一秒钟所做的功可用机械输出功率表示为

$$2\pi\tau \times \frac{n}{60} \text{ (kgf}\cdot\text{m/s)} \quad (2-5)$$

其电的输出功率为

$$P = E_t I_a \text{ (W)}$$

将其变为输入功率乘以 (2-1) 式的效率再除以1000 (将瓦变为千瓦)，则电动机的输出功率变为

$$E_t \frac{I_a}{1000} \eta \text{ (kW)} \quad (2-6)$$

又因1kW相当于1s 做 102kgf·m的功，由 (2-6) 式有

$$\text{电动机输出功率} = \frac{E_t I_a}{1000} \eta \times 102 \text{ (kgf}\cdot\text{m)} \quad (2-7)$$

(2-6) 式或 (2-7) 式均表示电动机电压为 E_t 、电流为 I_a 时，1s所做的功。因此

$$2\pi\tau \frac{n}{60} = \frac{E_t I_a}{1000} \eta \times 102 \text{ (kgf}\cdot\text{m/s)} \quad (2-8)$$

由上式可求出转矩