

电梯的电气拖动系统为电梯运行提供动力。在电梯系统中,有两个独立的拖动系统,它们驱动轿厢的上下运动和电梯门机的运动。

轿厢的上下运动是由曳引电动机拖动系统来实现的,通常由曳引电动机、速度反馈装置、电动机调速装置组成,由曳引电动机产生动力,经传动系统减速后驱动轿厢运动,其功率在几千瓦到几十千瓦之间。为了防止轿厢停止时由于重力而溜车,常设置制动器。曳引电动机拖动系统完成轿厢的上下、启动、加速、匀速运行、减速、平层停车等动作,另外,它决定着电梯的运行速度、舒适感、平层精度等。本章主要介绍曳引电动机拖动系统的结构形式和工作原理。

门机拖动系统的主要任务是实现电梯的轿门及厅门的开启与关闭。它由门机的电动机产生动力,经开关门机构减速后驱动轿门和厅门运动,其功率较小(通常在 200W 以下),是电梯的辅助驱动。如第 2 章所述,门机一般安装在轿门上部,驱动轿门的开启和关闭,厅门仅当轿厢停靠本层时由轿门的运动带动厅门实现开启和关闭。由于轿厢只有在轿门及所有厅门都关好的情况下才可以运行,因此,没有轿厢停靠的楼层,其厅门应是关闭的。门机拖动系统简单,其拖动系统及控制原理将在第 4 章介绍。

电梯在垂直升降运行过程中,要频繁地启动和制动,运行区间较短,经常处于过渡过程运行状态。因此,曳引电动机的工作方式属于断续周期性工作制。此外,电梯的负载经常在空载与满载之间随机变化,考虑到乘坐电梯的舒适性,需要限制最大运行加速度和加速度变化率。总之,电梯的运行对电气拖动系统提出了特殊要求。

直流电动机拖动系统具有调速范围宽、可连续平稳地调速以及控制方便、灵活、快捷、准确等优点。早期的直流电动机拖动系统采用直流发电机——电动机调速系统,它的体积、重量、能耗和噪声都较大,后来虽然晶闸管整流器取代了直流发电机,但是,直流电动机依然存在结构较复杂、价格较贵、可靠性差、维护困难等问题。20 世纪 80 年代,随着电力电子技术的不断发展和完善,交流调速技术日臻完善,由于交流感应电动机的结构简单、运行可靠、价格便宜,因此,交流调压调速系统和交流变压变频调速系统逐步成为电梯驱动系统的主流。目前,除了少数大容量电梯采用直流电动机拖动系统以外,几乎都采用交流电动机拖动系统。

本章首先介绍几种常见的电梯运行速度曲线,然后介绍几种常见的电梯拖动系统,包括直流调速、交流双速、变频调速电梯拖动系统及永磁同步电动机拖动系统的结构及工作原理。

### 3.1 电梯的速度曲线

电梯在运行时,对电梯的拖动系统来说,伴随着频繁的启动加速和制动减速过程,首先要考虑运行效率;其次,电梯是垂直升降的运输设备,与乘坐水平方向运动的交通工具相比,乘客对电梯运行速度的变化显得更为敏感。乘客在高速升降运动中,人体周围气压的迅速变化会对人的器官产生影响。电梯轿厢加速上升或减速下降时,乘客会有超重的感觉,这是由于人体内脏的质量向下压迫骨盆的缘故。当轿厢加速下降或减速上升时,乘客有失重的感觉,这是因为内脏提升压迫胸肺、心脏等,使人产生不适,甚至头晕目眩。因此,加速下降或减速上升所造成的失重感与加速上升或减速下降所造成的超重感相比,乘客感觉更加不适。

乘坐电梯的感觉与乘客的心理状态和健康状况等因素有关,各人差异较大。除此之外,经试验研究发现,乘坐电梯的下沉感和上浮感的强弱,与电梯运行的加速度和加速度变化率有直接关系。当加速度过大时,会使人有严重的不适感。国家标准规定,加速度最大值不得大于  $1.5\text{m/s}^2$ 。如果加速度过小,会延长加速运行过程,降低运行效率,而且会使乘客对速度的变化有波动感,同样有不适感觉。因此,国家标准规定,电梯额定速度在  $1.0\sim 2.0\text{m/s}$  时,加/减速度不应小于  $0.5\text{m/s}^2$ ,电梯额定速度在  $2.0\sim 5.0\text{m/s}$  时,加/减速度不应小于  $0.7\text{m/s}^2$ 。但是,相比之下,加速度变化率对舒适感的影响更大。当加速度变化率值过大时,会使乘客产生振动和颤抖感。人体所能承受的加速度变化率的最大值不大于  $5\text{m/s}^3$ ,一般限制在  $1.8\text{m/s}^3$  以下。如果将它限制在  $1.3\text{m/s}^3$  以下,即使加速度再大一些(即使达到  $2.0\sim 2.5\text{m/s}^2$ ),也不会使人感到过分不适。加速度变化率在电梯技术中被称为生理系数。

因此,电梯拖动系统应兼顾乘坐舒适感、运行效率和节约运行费用等方面的要求,研究电梯理想速度曲线,合理选择速度曲线,使电梯运行时按照给定的速度曲线运行,对提高电梯运行品质是至关重要的。电梯有三角形、梯形、抛物线形、抛物线一直线综合形速度曲线、正弦速度曲线等,根据电梯的运行状态和运行曲线,可以对电梯的运行速度、加速度、加速度变化率、分速度、运行时间和距离等参数的计算以及各参数间的关系进行详细分析。

#### 3.1.1 三角形速度曲线

三角形速度曲线如图 3.1(a)所示,电梯从停止状态开始以加速度  $a_m$  启动加速,当匀加速到最大运行速度  $v_m$  时,再以  $a_m$  做匀减速运行,直到零速停靠。

最大速度为

$$v_m = a_m t_m = \frac{1}{2} a_m T \quad (3.1)$$

在电梯以三角形速度曲线运行时,其加速度为

$$a(t) = \frac{d[v(t)]}{dt} = \begin{cases} a_m & 0 \leq t < t_m \\ -a_m & t_m \leq t < T \end{cases} \quad (3.2)$$

加速度变化率为

$$\rho(t) = \frac{d[a(t)]}{dt} = \frac{d^2[v(t)]}{dt^2} = \begin{cases} +\infty & t = 0 \\ 0 & 0 < t < t_m \\ -\infty & t = t_m \\ 0 & t_m < t < T \\ +\infty & t = T \end{cases} \quad (3.3)$$

加速度和加速度变化率曲线如图 3.1(b)和图 3.1(c)所示,  $\rho(t)$ 在加速、减速的开始和结束时,其值趋向无穷大,而在其余时间均为 0。三角形速度曲线的加速度不是平滑地变化而是突变,其加速度变化率的瞬时值为无穷大,会使乘客产生不适感。

电梯以三角形速度曲线运行时,电梯的运行距离为

$$H = \frac{1}{2}v_m T = \frac{1}{4}a_m T^2 = a_m t_m^2 \quad (3.4)$$

根据式(3.4)可以得到运行时间和最大运行速度、运行距离之间的关系

$$T = 2 \sqrt{H/a_m} \quad (3.5)$$

$$v_m = 2H/T \quad (3.6)$$

因此,当运行距离  $H$  一定时,若将加速度  $a_m$  增加,则最大速度  $v_m$  会增加,运行时间  $T$  减小,运行效率更高。

### 3.1.2 梯形速度曲线

梯形速度曲线如图 3.2 所示,电梯以  $a_m$  加速度启动加速,当匀加速运动到  $t_{a_1}$  时,达到最大运行速度  $v_m$ ,再以  $v_m$  匀速运行到  $t_{a_2}$ ,然后再以  $a_m$  做匀减速运行,直到零速停靠。

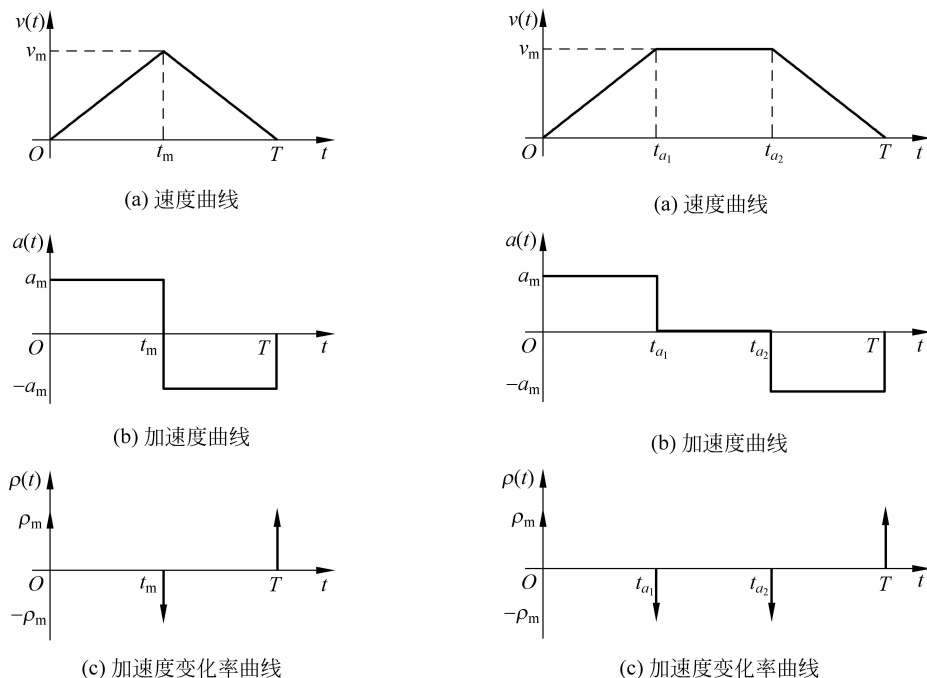


图 3.1 三角形速度曲线

图 3.2 梯形速度运行曲线

电梯以梯形速度曲线运行时,运行速度为

$$v(t) = \int_0^t a(\tau) d\tau = \begin{cases} a_m t & 0 \leq t < t_{a_1} \\ v_m & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ v_m - a_m t & t_{a_2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.7)$$

电梯加速度为

$$a(t) = \begin{cases} a_m & 0 \leq t < t_{a_1} \\ 0 & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ -a_m & t_{a_2} \leq t < T \end{cases} \quad (3.8)$$

加速度变化率为

$$\rho(t) = \begin{cases} +\infty & t = 0 \\ 0 & 0 < t < t_{a_1} \\ -\infty & t = t_{a_1} \\ 0 & t_{a_1} < t < t_{a_2} \\ -\infty & t = t_{a_2} \\ 0 & t_{a_2} < t < T \\ +\infty & t = T \end{cases} \quad (3.9)$$

由式(3.9)可以看出,  $\rho(t)$  在加速、减速过程的开始和结束时趋向无穷大,而在其余时间均为零。电梯以梯形速度曲线运行时,它的加速度不是平滑变化,而是阶跃突变的,在突变时其加速度变化率会瞬时变为无穷大,使乘客产生不适感。

电梯以梯形速度曲线运行时,电梯的运行距离为

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} a_m t^2 & 0 \leq t < t_{a_1} \\ \frac{1}{2} v_m t_{a_1} + v_m (t - t_{a_1}) & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ v_m t - \frac{1}{2} v_m t_{a_1} - \frac{1}{2} a_m (t - t_{a_2})^2 & t_{a_2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.10)$$

由式(3.7)及图 3.2 梯形速度曲线的几何意义,可得电梯总运行时间为

$$T = 2t_{a_1} + \frac{H - 2v_m t_{a_1}}{v_m} = \frac{2v_m}{a_m} + \frac{1}{v_m} \left( H - \frac{v_m^2}{a_m} \right) \quad (3.11)$$

其中  $H$  是电梯完成一个速度运行曲线过程的总运行距离,它可能是一个或多个楼层间距的尺寸。由式(3.11)可知,当运行距离  $H$  和最大运行速度  $v_m$  一定时,加速度  $a_m$  越大,运行时间  $T$  就越小;  $v_m$  越大,  $a_m$  对  $T$  的影响也越大。因此,对于高速电梯,取较大的加速度  $a_m$  值,对运行效率是有利的,但会降低舒适度。

与三角形速度曲线相比,当运行距离  $H$  一定时,梯形曲线的运行效率降低,但是舒适度有所提高。

### 3.1.3 抛物线—直线形速度曲线

梯形速度曲线的加速度由 0 突变到  $a_m$  时,其变化率为无穷大。这样,不但对电梯结构会造成过大的冲击,还使乘坐舒适感变差。图 3.3 为抛物线—直线形速度曲线。由开始启

动到  $t_{a_1}$  时刻为变加速运行抛物线段, 加速度由 0 逐渐线性增大, 当到  $t_{a_1}$  时刻, 加速度达到最大值; 此后, 进入匀加速运行段; 到  $t_{a_2}$  时刻, 加速度的变化开始减小, 直到  $t_{a_3}$  时刻开始进入匀速运行段。  $t_{a_4} \sim t_{a_6}$  为制动减速段, 其运行过程与启动加速段对称。由启动加速到制动减速停车, 总时间为  $T$ 。

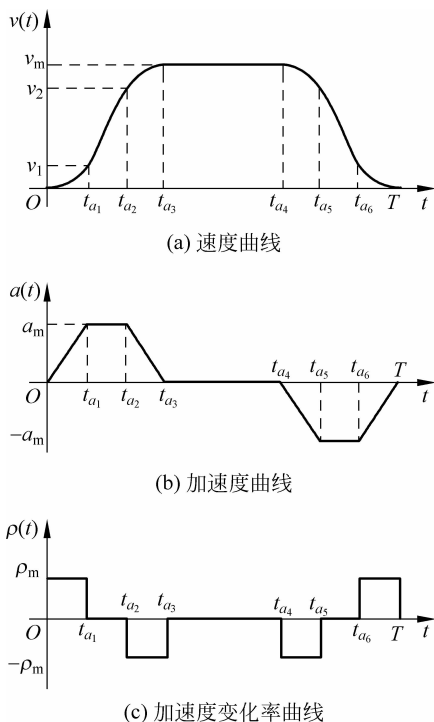


图 3.3 抛物线—直线形速度曲线

抛物线—直线形速度曲线的加速度曲线为梯形曲线, 如图 3.3(b) 所示, 这种运行曲线的加速度变化率也没有出现瞬时变为无穷大的情况, 如图 3.3(c) 所示。因此, 与前两种速度曲线相比, 电梯以抛物线—直线形速度曲线为给定速度运行时, 具有较好的舒适性。

在电梯运行过程中, 需要为它配置一种理想速度运行曲线, 电梯按照这个速度给定形式运行时, 能够兼顾舒适性好和运行效率高的要求。为了说明运行速度曲线中各段曲线参数之间的关系, 下面对抛物线—直线形速度曲线的各个速度段进行分析说明。

### 1. 启动加速阶段

在图 3.3 中, 由 0 到  $t_{a_1}$  时刻, 电梯以变加速方式运行。电梯加速度从 0 开始逐渐线性增大, 到  $t_{a_1}$  时刻达到最大加速度  $a_m$ 。

当  $0 \leq t \leq t_{a_1}$  时, 电梯运行在变加速抛物线段, 其加速度为

$$a(t) = \int_0^t \rho(\tau) d\tau = \int_0^t \rho_m d\tau = \rho_m t \quad (3.12)$$

电梯运行的速度为

$$v(t) = \int_0^t a(\tau) d\tau = \int_0^t \rho_m \tau d\tau = \frac{1}{2} \rho_m t^2 \quad (3.13)$$

电梯行进的距离为

$$h_1(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (3.14)$$

那么,在  $t=t_{a_1}$  时刻,电梯的运行速度和加速度分别为

$$v_1 = \frac{1}{2} \rho_m t_{a_1}^2 \quad (3.15)$$

$$a_1 = a_m = \rho_m t_{a_1} \quad (3.16)$$

由式(3.16)可得电梯运行速度达到  $v_1$  所需的时间为

$$t_{a_1} = \frac{a_m}{\rho_m} \quad (3.17)$$

把式(3.17)带入式(3.15)可得

$$v_1 = \frac{1}{2} \rho_m \cdot \frac{a_m^2}{\rho_m^2} = \frac{1}{2} \frac{a_m^2}{\rho_m} \quad (3.18)$$

则到  $t=t_{a_1}$  时刻,电梯变加速运行结束时,它的运行距离为

$$H_1 = \int_0^{t_{a_1}} v(t) dt = \frac{1}{6} \rho_m t_{a_1}^3 = \frac{1}{6} \frac{a_m^3}{\rho_m^2} \quad (3.19)$$

## 2. 匀加速段

在图 3.3 中,由  $t_{a_1}$  到  $t_{a_2}$  时刻,电梯以匀加速方式运行,加速度为  $a_m$ 。

当  $t_{a_1} < t \leq t_{a_2}$  时,电梯的运行速度为

$$v(t) = v_1 + \int_{t_{a_1}}^t a(\tau) d\tau = v_1 + a_m(t - t_{a_1}) \quad (3.20)$$

在此期间,电梯运行的距离为

$$h_2(t) = \int_{t_{a_1}}^t v(\tau) d\tau = v_1(t - t_{a_1}) + \frac{1}{2} a_m(t - t_{a_1})^2 \quad (3.21)$$

在  $t=t_{a_2}$  时刻,电梯的运行速度达到

$$v_2 = v_1 + a_m(t_{a_2} - t_{a_1}) \quad (3.22)$$

在匀加速阶段,电梯运行的距离为

$$H_2 = v_1(t_{a_2} - t_{a_1}) + \frac{1}{2} a_m(t_{a_2} - t_{a_1})^2 \quad (3.23)$$

## 3. 变减速阶段

在图 3.3 中,由  $t_{a_2}$  到  $t_{a_3}$  时刻,电梯以变减速方式运行,加速度从最大值  $a_m$  逐渐线性减小,到  $t_{a_3}$  时刻,加速度减为 0。

当  $t_{a_2} < t \leq t_{a_3}$  时,电梯的运行加速度为

$$a(t) = a_m + \int_{t_{a_2}}^t \rho(\tau) d\tau = a_m + \int_{t_{a_2}}^t -\rho_m d\tau = a_m - \rho_m(t - t_{a_2}) \quad (3.24)$$

电梯运行的速度为

$$\begin{aligned} v(t) &= v_2 + \int_{t_{a_2}}^t a(\tau) d\tau = v_2 + \int_{t_{a_2}}^t [a_m - \rho_m(t - t_{a_2})] d\tau \\ &= v_2 + a_m(t - t_{a_2}) - \frac{1}{2} \rho_m(t - t_{a_2})^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

在此期间,电梯运行的距离为

$$h_3(t) = \int_{t_{a_2}}^t v(\tau) d\tau = v_2(t - t_{a_2}) + \frac{1}{2}a_m(t - t_{a_2})^2 - \frac{1}{6}\rho_m(t - t_{a_2})^3 \quad (3.26)$$

在  $t=t_{a_3}$  时, 电梯的运行速度达到最大, 其值为

$$v_3 = v_m = v_2 + a_m(t_{a_3} - t_{a_2}) - \frac{1}{2}\rho_m(t_{a_3} - t_{a_2})^2 \quad (3.27)$$

在变减速阶段, 电梯运行的距离为

$$H_3 = v_2(t_{a_3} - t_{a_2}) + \frac{1}{2}a_m(t_{a_3} - t_{a_2})^2 - \frac{1}{6}\rho_m(t_{a_3} - t_{a_2})^3 \quad (3.28)$$

实际上,  $t=t_{a_3}$  时, 电梯的运行速度  $v_m$  为

$$v_m = \int_0^{t_{a_3}} a(\tau) d\tau \quad (3.29)$$

在图 3.3 中, 由于变减速和变加速阶段的加速度变化率是相同的, 因此, 加速度曲线的梯形是对称的,  $t_{a_3} - t_{a_2} = t_{a_1} - 0 = t_{a_1}$ , 图 3.3(b) 的加速度曲线下包含的面积可等效为一个矩形面积, 该矩形的幅值为  $a_m$ 、时间宽度从 0 时刻开始持续到  $t_{a_2}$  时刻。则

$$v_m = \int_0^{t_{a_2}} a(\tau) d\tau = a_m t_{a_2} \quad (3.30)$$

由式(3.30)可求得

$$t_{a_2} = v_m / a_m \quad (3.31)$$

把  $t_{a_1}$ 、 $t_{a_2}$  和  $v_1$  的式(3.17)、式(3.31)和式(3.18)代入式(3.22)、式(3.23)和式(3.28), 把  $v_2$ 、 $H_2$  和  $H_3$  用  $a_m$ 、 $\rho_m$  和  $v_m$  表示, 那么

$$v_2 = \frac{2v_m\rho_m - a_m^2}{2\rho_m} \quad (3.32)$$

$$H_2 = \frac{v_m(v_m\rho_m - a_m^2)}{2a_m\rho_m} \quad (3.33)$$

$$H_3 = \frac{6v_m a_m \rho_m - a_m^3}{6\rho_m^2} \quad (3.34)$$

进一步, 可求得电梯在  $0 \sim t_{a_3}$  时刻的启动加速阶段的运行距离为

$$H_a = H_1 + H_2 + H_3 = \frac{a_m^3}{6\rho_m^2} + \frac{v_m(v_m\rho_m - a_m^2)}{2a_m\rho_m} + \frac{6v_m a_m \rho_m - a_m^3}{6\rho_m^2} = \frac{a_m^2 v_m + \rho_m v_m^2}{2a_m \rho_m} \quad (3.35)$$

电梯加速过程的运行时间为

$$t_a = t_{a_3} = 2t_{a_1} + \frac{v_2 - v_1}{a_m} = \frac{2a_m}{\rho_m} + \frac{1}{a_m} \left( v_m - \frac{a_m^2}{\rho_m} \right) = \frac{2a_m}{\rho_m} + \frac{v_m}{a_m} - \frac{a_m}{\rho_m} = \frac{a_m}{\rho_m} + \frac{v_m}{a_m} \quad (3.36)$$

设电梯总的运行距离为  $H$ , 在最大速度  $v_m$ 、最大加速度  $a_m$  和加速度变化率  $\rho_m$  均一定时, 可以求得总时间  $T$  为

$$T = 2t_a + \frac{H - 2H_a}{v_m} \quad (3.37)$$

将式(3.35)和式(3.36)代入式(3.37), 经整理后得到

$$T = 2 \left( \frac{a_m}{\rho_m} + \frac{v_m}{a_m} \right) + \frac{1}{v_m} \left( H - \frac{a_m^2 v_m + \rho_m v_m^2}{a_m \rho_m} \right) = \frac{a_m}{\rho_m} + \frac{v_m}{a_m} + \frac{H}{v_m} \quad (3.38)$$

式(3.38)表明, 电梯以抛物线—直线形速度曲线作为给定速度曲线运行时, 当运行距离

$H$ 、最大运行速度  $v_m$ 、最大加速度  $a_m$  和加速度变化率  $\rho_m$  一定时,加速度变化率  $\rho_m$  越大,则运行时间  $T$  就越小,在一定范围内增加最大加速度  $a_m$ ,也会使运行时间  $T$  减小;而且  $v_m$  越大,则  $a_m$  对  $T$  的影响越大。因此,对于高速电梯,适当增加  $a_m$  和  $\rho_m$  值,对高速运行效率有利。但是必须考虑满足舒适感的要求,因此,在电梯运行时, $a_m$  和  $\rho_m$  不应超过规定的最大极限值。

### 3.1.4 抛物线速度曲线

抛物线速度曲线如图 3.4 所示,它是理想的运行速度曲线。由式(3.33)可知,当  $v_m \rho_m = a_m^2$  时,电梯以抛物线—直线速度曲线运行时,匀加速段的运行距离  $H_2 = 0$ ,于是,在图 3.3 中, $t_{a_1}$  与  $t_{a_2}$  重合成一点,此时,速度给定曲线由抛物线—直线转变为抛物线,加速度曲线也由梯形变为三角形,如图 3.4 所示。

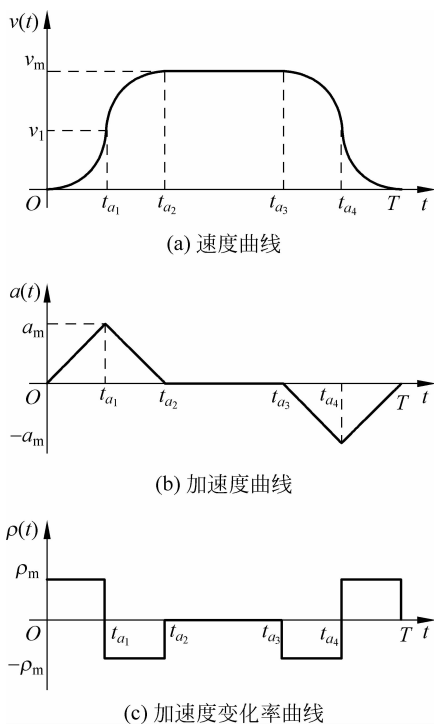


图 3.4 抛物线速度曲线

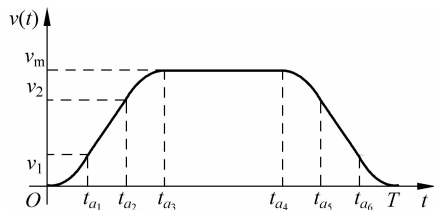
对于抛物线速度曲线,当最大速度  $v_m$  值较大时,其加速度最大值  $a_m$  也必然增大。为了改善乘坐舒适感,最大加速度  $a_m$  值不能大于允许的极限值,而要满足  $v_m \rho_m = a_m^2$ ,  $\rho_m$  值需要减小。这样,启动加速运行时间  $t_a$  ( $t_a = 2t_{a_1} = 2a_m / \rho_m$ ) 必然延长。抛物线速度曲线克服了梯形速度曲线的缺点,光滑度好,无拐点,改善了电梯运行的舒适感,但在高速和超高速电梯的运行中,启动、制动速度曲线仅为抛物线会使运行效率太低。

在  $v_m$  和  $\rho_m$  均为一定的情况下,为了改善乘坐舒适感,需要减小  $a_m$  值,由式(3.33)可知,此时有  $v_m \rho_m > a_m^2$ ,  $H_2 \neq 0$ ,即已是抛物线—直线速度曲线。虽然直线段运行时间有所延长,但抛物线段运行时间却有所减少,所以被设定的启动加速运行时间  $t_a$  基本不受影响。说明抛物线—直线速度曲线既能满足乘坐舒适感要求,又不影响运行效率,相比之下,抛

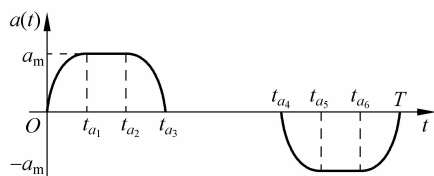
线—直线速度曲线更为理想。

### 3.1.5 正弦速度曲线

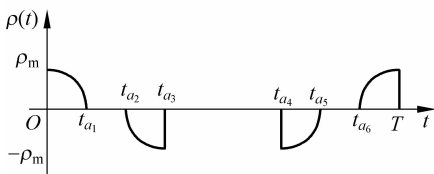
如果加速度按正弦规律变化,则所得到的运行速度曲线就是正弦速度曲线,如图 3.5 所示。电梯首先以正弦规律变化的加速度启动,在  $t_{a_1}$  时刻,电梯运行速度达到  $v_1$ ,然后以匀加速方式运行,到  $t_{a_2}$  时刻,电梯的运行速度达到  $v_2$ ,然后以变减速的方式使加速度以正弦规律逐渐减小,到  $t_{a_3}$  时刻,加速度减为 0,其运行速度达到  $v_m$ ,从此刻开始,电梯匀速运行。在  $t_{a_4}$  时刻,电梯运行进入减速阶段,减速过程与加速过程顺序相反。



(a) 速度曲线



(b) 加速度曲线



(c) 加速度变化率曲线

图 3.5 正弦速度曲线

式(3.39)是电梯运行正弦给定曲线的表达式,其中, $\omega$  为正弦速度曲线的角频率, $A$  为正弦函数的幅值,设加减速期间速度运行曲线取自正弦函数曲线的某一段,加速过程和减速过程是对称的, $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  为所选区间的初始角。正弦速度曲线的表达式为

$$v(t) = \begin{cases} \{A[1 - \cos(\omega t + \alpha_0)]\} & 0 \leq t < t_{a_1} \\ v_1 + a_m(t - t_{a_1}) & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ A\{1 - \cos[\omega(t - t_{a_2}) + \alpha_1]\} & t_{a_2} \leq t < t_{a_3} \\ v_m & t_{a_3} \leq t < t_{a_4} \\ A\{1 - \cos[\omega(t - t_{a_4}) + \alpha_2]\} & t_{a_4} \leq t < t_{a_5} \\ v_2 - a_m(t - t_{a_5}) & t_{a_5} \leq t < t_{a_6} \\ A\{1 - \cos[\omega(t - t_{a_6}) + \alpha_3]\} & t_{a_6} \leq t < T \end{cases} \quad (3.39)$$

其中  $v_1 = A[1 - \cos(\omega t_{a_1} + \alpha_0)]$ ,  $v_2 = v_1 + a_m(t_{a_2} - t_{a_1})$ ,  $v_m = A[1 - \cos(\omega t_{a_2} + \alpha_1)]$ 。它的加速度表示式为

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \begin{cases} \omega A \sin(\omega t + \alpha_0) & 0 \leq t < t_{a_1} \\ a_m & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ \omega A \sin[\omega(t - t_{a_2}) + \alpha_1] & t_{a_2} \leq t < t_{a_3} \\ 0 & t_{a_3} \leq t < t_{a_4} \\ \omega A \sin[\omega(t - t_{a_3}) + \alpha_2] & t_{a_4} \leq t < t_{a_5} \\ -a_m & t_{a_5} \leq t < t_{a_6} \\ \omega A \sin[\omega(t - t_{a_6}) + \alpha_3] & t_{a_6} \leq t < T \end{cases} \quad (3.40)$$

它的加速度变化率表示式为

$$\rho(t) = \frac{da(t)}{dt} = \begin{cases} \omega^2 A \cos(\omega t + \alpha_0) & 0 \leq t < t_{a_1} \\ 0 & t_{a_1} \leq t < t_{a_2} \\ \omega^2 A \cos[\omega(t - t_{a_2}) + \alpha_1] & t_{a_2} \leq t < t_{a_3} \\ 0 & t_{a_3} \leq t < t_{a_4} \\ \omega^2 A \cos[\omega(t - t_{a_3}) + \alpha_2] & t_{a_4} \leq t < t_{a_5} \\ 0 & t_{a_5} \leq t < t_{a_6} \\ \omega^2 A \cos[\omega(t - t_{a_6}) + \alpha_3] & t_{a_6} \leq t < T \end{cases} \quad (3.41)$$

在变加速运行段,加速度变化率  $\rho(t)$  不再是恒定值,使乘坐舒适感得到改善。正弦速度曲线也是一种理想速度给定曲线。读者可以根据正弦速度曲线计算出各个时段的运行距离。

### 3.1.6 电梯的分速度曲线

在电梯运行时,由于楼层间距离的限制,使得电梯还没到达稳定运行的额定速度,就要减速准备停靠,这种运行方式被称为分速度运行。例如,在许多高层建筑中安装的高速和超高速电梯,在两层站间电梯的运行达不到额定速度而出现以分速度运行的情况,这时电梯仅处于启动和制动运行状态。下面以抛物线—直线运行速度曲线来说明电梯的分速度运行原理。

图 3.6 为一种高速电梯的分速度运行曲线。根据设定的最大速度  $a_m$ 、加速度变化率  $\rho_m$  以及停靠楼层间运行距离  $H$  可以判断分速度运动启动、制动速度曲线是抛物线—直线、抛物线还是不完全抛物线。

如图 3.6 所示,分速度运行的启动、制动速度曲线为抛物线—直线。在加速阶段,  $0 \sim t_{a_1}$  期间为变加速抛物线段,  $t_{a_1} \sim t'_{a_2}$  期间为匀加速直线段,  $t'_{a_2} \sim t'_a$  期间为变减速的抛物线段。这段匀加速直线段的长度在最大加速度  $a_m$  和加速度变化率  $\rho_m$  为确定值的情况下,与分速度运行时不同的最大速度  $v'_m$  对应。设分速度运行的总运行时间为  $T'$ , 在  $0 \sim t'_a$  加速运行期间,其加速度曲线为等腰梯形(见图 3.3),等腰梯形包含的面积即为分速度最大运行速度,因此

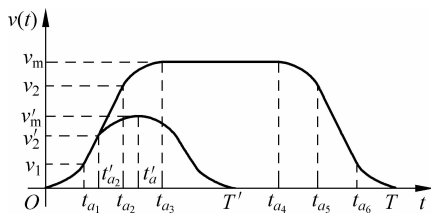


图 3.6 电梯的分速度运行曲线

$$\begin{aligned} v'_m &= \frac{1}{2}\rho_m t_{a_1}^2 + a_m(t'_{a_2} - t_{a_1}) + \frac{1}{2}\rho_m(t'_a - t'_{a_2})^2 \\ &= \frac{1}{2}\rho_m t_{a_1}^2 + a_m(t'_a - t_{a_1}) + \frac{1}{2}\rho_m t_{a_1}^2 = \rho_m t_{a_1}^2 + a_m(t'_a - t_{a_1}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

由于  $t_{a_1} = \frac{a_m}{\rho_m}$ ,  $t'_{a_2} = t'_a - (t'_a - t'_{a_2}) = t'_a - t_{a_1} = \frac{T'}{2} - t_{a_1}$ , 因此

$$v'_m = \frac{a_m}{2}T' - \frac{a_m^2}{\rho_m} \quad (3.43)$$

由式(3.35)和式(3.43)可求出分速度运行的距离为:

$$H'_a = \frac{a_m v'_m}{\rho_m} + \frac{(v'_m)^2}{a_m} = \frac{a_m T'^2}{4} - \frac{a_m^2 T'}{2\rho_m} \quad (3.44)$$

由式(3.44)可求出分速度运行的总时间为

$$T' = \frac{a_m}{\rho_m} \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4\rho_m^2}{a_m^3} H'_a} \right) \quad (3.45)$$

如果分速度运行启动、制动的速度曲线为抛物线形,那么在图 3.6 中,  $t'_{a_2}$  和  $t_{a_1}$  重合,没有匀加速的线段,这种情况下,  $t_{a_1}$  时刻的速度为

$$v_1 = \frac{1}{2}\rho_m t_{a_1}^2 = \frac{1}{2} \frac{a_m^2}{\rho_m} \quad (3.46)$$

最大的运行速度为

$$v''_m = 2v_1 = \frac{a_m^2}{\rho_m} \quad (3.47)$$

由式(3.34)和式(3.36)可以求得这种情况下电梯的启动加速运行距离为

$$H''_a = H_1 + H_2 = \frac{a_m^3}{6\rho_m^2} + \frac{6a_m\rho_m v''_m - a_m^3}{6\rho_m^2} = \frac{a_m v''_m}{\rho_m} = \frac{a_m^3}{\rho_m^2} \quad (3.48)$$

启动、停止的总距离为

$$H'' = 2H''_a = \frac{2a_m^3}{\rho_m^2} \quad (3.49)$$

由式(3.49)可求出最大加速度为

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{H''\rho_m^2}{2}} \quad (3.50)$$

把式(3.50)代入式(3.47),则最大运行速度  $v_m$  为

$$v_m = \sqrt[3]{\frac{H''^2\rho_m}{4}} \quad (3.51)$$

进一步可求得电梯启动加速、制动减速的总时间为

$$T'' = 4t_{a_1} = 4 \frac{a_m}{\rho_m} = \sqrt[3]{\frac{32H''}{\rho_m}} \quad (3.52)$$

电梯以抛物线—直线速度曲线运行时,在正常启动加速、制动减速过程中的运行距离是启动加速过程的2倍,因此,在最大加速度  $a_m$  和额定运行速度  $v_m$  已知时,由式(3.35)的加速过程距离公式可以求得电梯正常启动加速、制动减速的运行距离为

$$H' = 2H_a = \frac{a_m^2 v_m + \rho_m v_m^2}{a_m \rho_m} \quad (3.53)$$

设电梯实际运行的层站间的距离  $S$ ,如果  $S$  小于它的正常启动加速、制动减速的运行距离  $H'$  时,电梯处于分速度运行状态。

此时,如果实际运行距离介于抛物线速度曲线距离和正常启动加速、制动减速的运行距离之间,即  $H'' < S < H'$  时,则电梯以抛物线—直线速度曲线方式运行。

如果实际运行距离与以抛物线速度曲线运行的距离相等,即  $S = H''$ ,则电梯以抛物线速度曲线方式运行。

如果实际运行距离比以抛物线速度曲线运行的距离短,即  $S < H''$ ,则电梯以不完全抛物线速度曲线方式运行。

读者可以按照本节的计算公式,根据电梯实际运行的层站间的距离,确定其速度运行曲线,如图3.7所示,求出各种运行状态下的最大运行速度和运行时间。

对于中速和快速电梯,当判断为分速度运行时,常根据另一种抛物线—直线分速度运行速度给出曲线,如图3.8所示,通常以  $1/2 \sim 2/3$  额定速度的中速作为单层分速运行速度。

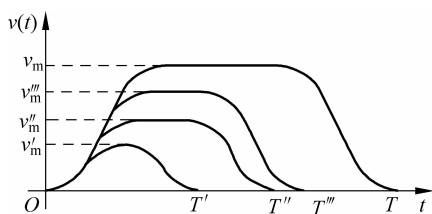


图 3.7 不同距离的速度运行曲线

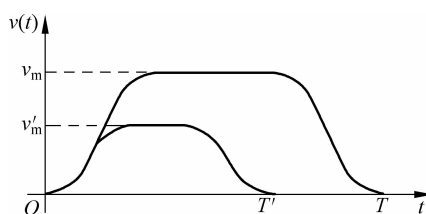


图 3.8 中高速电梯的分速度给定曲线

## 3.2 电梯拖动系统的分类

电梯的拖动系统为轿厢的上下运动提供动力。电梯在运行过程中是根据给定的速度曲线运行的,由控制系统控制调速过程,调速过程一般遵循着速度变化曲线,实现电梯的启动加速、匀速运行和制动减速。拖动系统的优劣直接影响电梯的启动、制动加减速度、平层精度、乘坐的舒适感等指标。

电梯的电力拖动系统按照电源形式可分为直流和交流拖动系统两大类。

直流电梯拖动系统通常分为两种:一种是用发电机组构成的可控硅励磁的发电机—电动机驱动系统,它通过调节发电机的励磁来改变直流电动机的输入电压,以此调节电动机的转速。这种直流电梯拖动系统结构复杂、耗电量大、维修麻烦、效率很低,已被淘汰。另一种是可控硅直接供电的可控硅—电动机系统,采用可控硅把交流电直接整流、滤波、稳压,变成可控的直流电供给直流电机,以此调节电动机的转速。这种直流电梯拖动系统省去了发电

机组,结构紧凑,但需要大功率半导体器件的支持。

直流电梯具有调速性能好、调速范围大的特点,因此,电梯具有速度平稳、启动和制动控制容易实现、平层准确度高、舒适感好等优点。多用于速度较高的电梯。

交流拖动系统可分为三种:交流变极调速系统、交流变压(AC Variable Voltage, ACVV)调速系统和变频变压(Variable Voltage Variable Frequency, VVVF)调速系统。

交流变极调速系统驱动方式采用交流双速异步电动机,由于电动机的转速与它的极对数成反比,因此,只要改变电动机定子绕组的极对数就可改变电动机的同步转速。交流双速异步电动机本身具有快速和慢速两组绕组。启动时用快速绕组进行降压启动,到站平层时由快速绕组切换到慢速绕组限流限速制动,平层精度靠制动器的抱闸松紧来控制。这种系统大多采用开环方式控制,线路比较简单,成本低廉,维修方便,但电梯的舒适感和平层精度不佳,一般用于 1.0m/s 以下的低速电梯。

交流变压调速(ACVV)驱动方式采用可控硅闭环调速方式,它的制动可采用涡流制动、能耗制动、反接制动方式。ACVV 电梯的优点是电梯在加速、匀速和减速过程中能够保持高动力参数。这种驱动方式的电梯乘坐舒适感好,平层精度高,明显优于交流双速拖动系统。交流变压调速系统有三种形式,第一种是电梯运行全过程的调压调速,第二种是电梯的启动过程和制动过程实现自动调速,第三种是只在制动过程实现自动调速。

交流变压变频调速(VVVF)驱动方式采用交流异步电动机提供动力。变频调速通过改变异步电动机供电电源频率来调节电动机的同步转速。变频变压调速是调节电机的供电电压和供电频率来线性地调节电机的输出转速,将交流电动机转速运行曲线的线性段区域扩大。由于系统采用高精度光电编码器和全数字化控制技术,使电梯平层精度达到毫米级,并能保证电动机零速抱闸,所以该电梯乘坐舒适感非常好。另外,系统可采用多台微处理机对电梯的运行进行控制和管理,实现智能化。VVVF 控制的电梯具有高速高性能、运行效率高、节约电能、舒适感好、平层精度高、运行噪声小、安全可靠、维修方便等优点,目前广泛应用在电梯中。

### 3.3 直流拖动系统

直流电动机调速性能好、调速范围宽,因此很早就被用于电梯上。在 20 世纪 80 年代之前,即交流变频调速在工业中应用之前的 100 多年里,高性能的调速系统几乎为直流调速所垄断。直流电梯具有速度快、舒适感好,平层准确度高的特点,但是同时存在机组结构体积大、耗电大、维护工作量较大、造价高等缺点。

#### 3.3.1 直流拖动系统的调速方法

由图 3.9 可列出直流电梯拖动系统电动机的电势平衡方程式:

$$E_a = U_a - I_a(R_a + R_t) \quad (3.54)$$

$$E_a = C_e \phi n \quad (3.55)$$

式(3.54)和式(3.55)中, $E_a$ 为电动机感应电势, $U_a$ 为电枢外加电压, $I_a$ 为电枢电流, $R_a$ 为电枢电阻, $R_t$ 为调整电阻, $n$ 为转速, $C_e$ 为电势常数, $\phi$ 为励磁磁通。则直流电动机的转速为

$$n = \frac{U_a - I_a(R_a + R_t)}{C_e \phi} \quad (3.56)$$

从式(3.56)可以看出,直流电动机的实际转速是与电压、电流、回路总电阻、磁通量等因素有关的,并且与电压成正比,与磁通成反比。因此,为了获得直流电动机的转速变化,一般采用的方法有:

- (1) 改变端电压  $U_a$ ;
- (2) 调节调整电阻  $R_t$ ;
- (3) 改变励磁磁通  $\phi$ 。

但是,通常很少采用改变电动机磁通量的方法。

在保持电动机磁通量不变的情况下,改变电枢两端的电压  $U_a$  是较为理想的方法。因为对于直流电机来说,在保持电动机磁通量不变的情况下,不同电压时的特性曲线是平行的,如图 3.10 所示,即所谓“特性硬度”不变,也就是说,在同一电压下,负载变化时,其转速变化不大。在不同电压下,其转速变化量始终保持不变,因此在直流快速电梯中就用这种方法来调节电梯的速度。

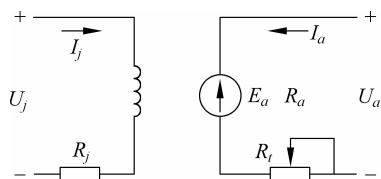


图 3.9 直流电动机电路

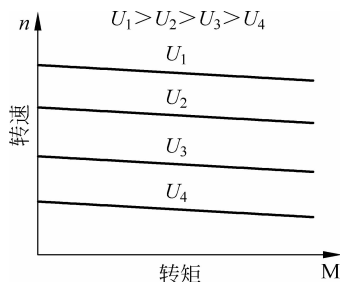


图 3.10 直流电动机机械特性

直流电梯中,基本上都是采用调节电枢端电压的方法实现调速的,按照直流电源的获取方式可以将直流电梯拖动系统分为两类:可控硅励磁的发电机—电动机的拖动系统和可控硅直接供电的可控硅—电动机系统。

可控硅励磁的发电机—电动机的拖动系统如图 3.11 所示,利用调整直流电动机两端电压  $U_a$  的方法进行调速,即通过可控硅(晶闸管)整流电路调节发电机的励磁改变发电机的输出电压进行调速,所以称为可控硅励磁系统。

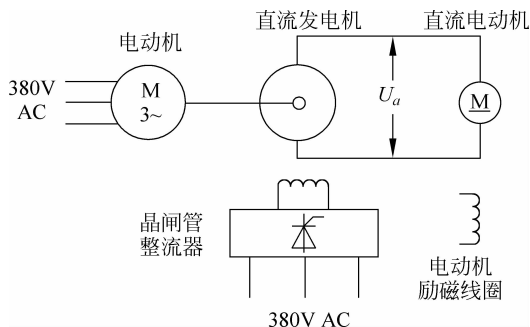


图 3.11 可控硅励磁的发电机—电动机的拖动系统

可控硅直接供电的可控硅—电动机系统如图 3.12 所示,同样是利用调整电动机端电压  $U_a$  的方法进行调速,它采用三相可控硅整流器,把交流变为可控直流,供给直流电动机的调速系统,省去了发电机组,因此降低了造价,并使结构更加紧凑。

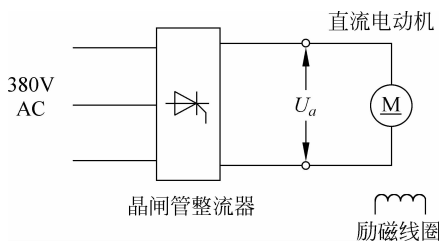


图 3.12 可控硅直接供电的可控硅—电动机系统

### 3.3.2 电梯的直流拖动系统原理

#### 1. 直流发电机—电动机拖动系统

图 3.13 是传统的开环控制直流快速电梯拖动系统原理图。它是由三相交流电动机带动同轴相连的直流发电机,通过调节直流发电机磁场绕组的励磁电流,使得发电机输出可以变化的直流电压给直流电动机,直流电动机再通过涡轮减速箱带动电梯上下运行。当发电机输出电压逐渐升高时,直流电动机的转速也将逐渐升高,这样使得电梯的速度也从静止逐渐启动加速到额定速度值。

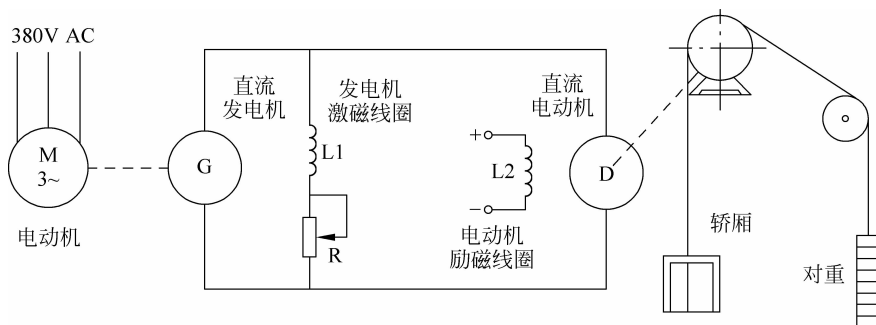


图 3.13 开环控制直流快速电梯拖动系统原理图

由于直流发电机的电压可以任意调节,不仅可以提供电梯按额定速度所需的电压值,而且也可以获得电梯平层时较低速度所需的电压值,这两个电压值之比,也就是直流电动机的高低转速之比,通常称为直流电动机的调速范围

$$D = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.57)$$

式中,  $n_1$  为电梯额定转速(高速),  $n_2$  为电梯平层停车时的转速(低速)。

对于一般直流发电机—电动机系统,调速范围  $D$  约为 10 或大于 10,直流快速电梯的运行性能虽然比交流电梯好,但当负荷或其他因素发生变化而不能把变化的转速信号反馈到控制输入端,从而导致对由于载荷变化而引起的速度变化不能进行控制时,电梯的使用效率及其停层精确度均将难以控制。所以现在这种传统的开环直流电梯已被闭环的、由静止元

件供电的直流快速电梯所取代。

## 2. 可控硅励磁的发电机—电动机拖动系统

图 3.14 是一种快速直流电梯速度调节系统原理图。系统中有给定的信号(亦称指令信号),一般是典型的串联型稳压电源。给定电源经分压电阻后给出的是阶跃信号,再经积分转换变成了软化处理后圆滑的梯形信号。测速发电机可以取得与电梯速度成正比的电压信号。速度给定信号与测速机电压比较后得到的误差信号,加到具有比例积分的速度调节器进行放大调节。要求调节环节的响应过程既快又稳,不能引起响应信号的振荡,然后输出加到反并联的两组触发器上,使两组触发器同时得到两个符号相反、大小相等的控制信号,控制两组触发器的输出脉冲同时向相反方向做相等角度的移动,用以控制可控硅整流器的输出电压的大小和极性。可控硅整流器的输出电压控制直流发电机的励磁磁通,使发电机电枢输出电压随之变化,电机转速随发电机输出电压而变化,最终使速度跟随给定的速度曲线变化,达到速度自动调节的目的。

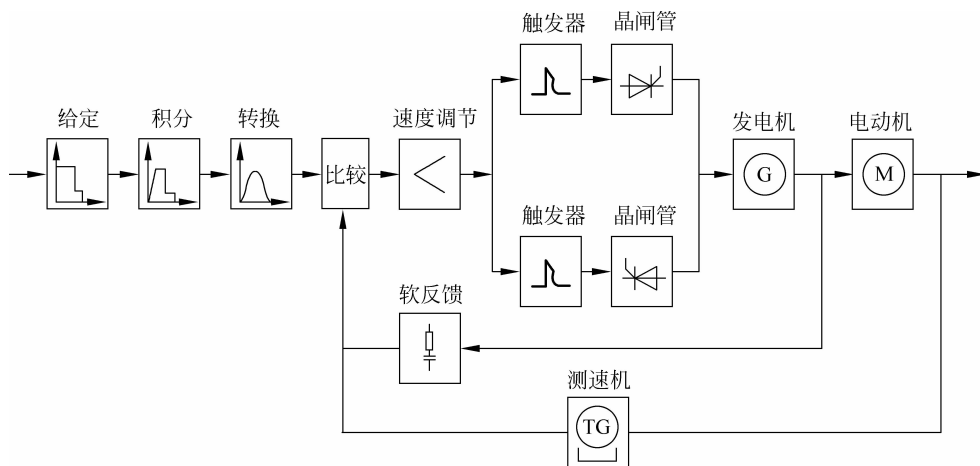


图 3.14 快速直流电梯速度调节系统原理图

在该系统中,当转换器输出一个正电压时,与测速发电机电压比较后,加给速度调节器一个正的速度误差信号,速度调节器输出一个负电压,使正向组触发器的输出脉冲前移,正向组可控硅整流组工作在整流状态。与此同时,反向组触发器的输出脉冲后移,反向组可控硅整流组工作在待逆变状态。结果供给发电机正的励磁电流使其输出正电压,电动机正转,电梯上升运行。反之,则电机反转,电梯下行。

图 3.15 为高速电梯速度自动调节系统原理图。与快速梯相比较增加了电流调节器、电流检测、预负载信号和电平检测等环节。电流调节器可以提高系统的动态品质,使电梯启动、制动过程中主回路电流的丰满度较好。另外,在调节器的同相输入端还加进了轿厢的预负载信号(此信号可由称量装置检测得到,并把重量信号转换成电信号,以反映轿厢内的重量),使主回路产生一个预负载力矩,以避免抱闸打开的瞬间产生溜车的现象。

## 3. 可控硅直接供电的直流拖动系统

图 3.16 是一种由可控硅直接供电的直流快速电梯拖动系统原理图,它主要由两组可控硅取代了传统驱动系统中的直流发电机组。两组可控硅可以进行相位控制,或处于整流或处于逆变状态。当控制电路对给定的速度指令信号与速度反馈信号、电流反馈信号进行比

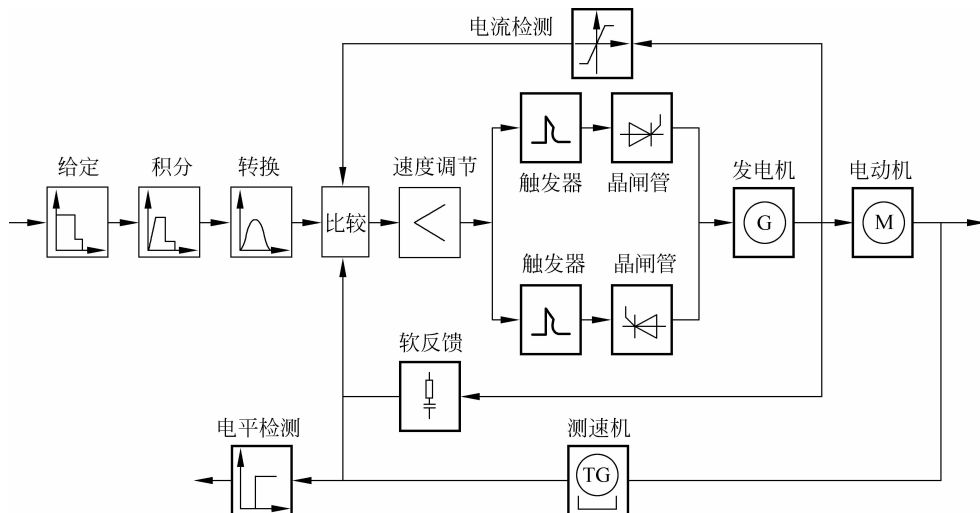


图 3.15 高速电梯速度自动调节系统原理图

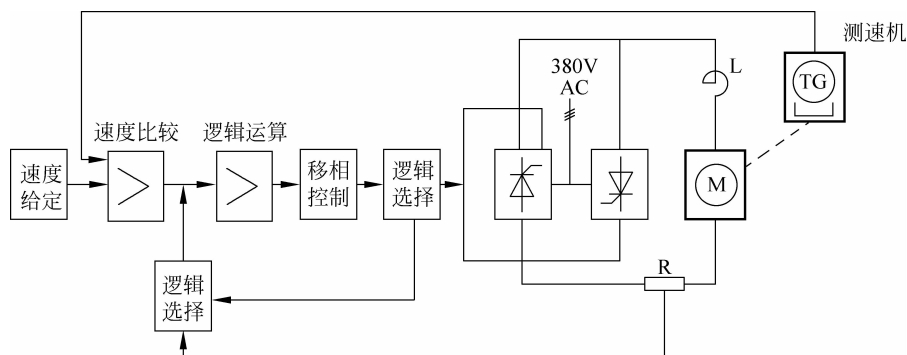


图 3.16 可控硅供电的直流高速电梯的拖动系统的原理图

较运算后,就决定了两组可控硅整流装置中哪一组应该投入运行,并根据运算结果,控制可控硅整流装置的输出电压,即曳引电动机的电枢电压,使电梯跟随速度指令信号运行。

常用的可控硅整流电路是将电源变压器接成三角形—星形,副边有中心抽头。正反向可控硅分别把电源变压器三相的正半波或负半波换成直流电,正向或反向加于直流电动机的电枢端,使电机正转或反转。而电枢端电压的大小变化,则由控制可控硅的脉冲相位移动所决定。

### 3.4 交流双速拖动系统

交流电动机具有结构紧凑、维护简单的特点。交流双速拖动系统采用开环方式控制,结构和技术简单,价格较低,因此目前这种拖动方式在电梯中仍有使用。但这类电梯运行舒适度较差,额定速度一般在  $1.0\text{m/s}$  以下。交流双速拖动系统交流电动机的调速方法主要是通过改变极对数而得到不同的速度。

### 3.4.1 交流双速电梯调速原理

由电机学原理可知,交流感应电动机的转速公式如下:

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (3.58)$$

式中, $n$ 为交流感应电动机的同步转速, $f$ 为交流感应电动机定子的供电电源频率, $p$ 为交流感应电动机定子的极对数, $s$ 为转差率。由式(3.58)可知,交流异步电动机的转速是与其极对数成反比的。改变电动机的极对数就可以改变电动机的同步转速,因此,改变电动机的极对数是最简单的变速方法。

电梯用的交流电动机有单速、双速及三速。

单速交流电动机仅用于速度较低的杂物梯。

双速交流电动机定子的绕组一般为4/16极、6/24极,少数也有4/24极或6/36极;极数少的绕组称为快速绕组,极数多的绕组称为慢速绕组。

三速电动机的磁场极数一般有两种:

(1) 6/8/24极。它比双速梯多3个8极(同步转速为750r/min),这一绕组主要用于电梯在制动减速时的附加制动绕组,使减速开始的瞬间具有较好的舒适感,有了8极绕组就可以不用在减速时串入附加的电阻或电抗器。

(2) 6/4/18极。6极绕组作为启动绕组以限制启动电流,使启动电流小于2.5倍额定电流,待电动机转速达到650r/min时自动切换到4极绕组,4极绕组作为正常稳速运行用,18极绕组作为制动减速和平层停车用。

变极调速是一种有级调速,调速范围不大,因为过大地增加电极数,就会显著地增大电机的外形尺寸。

### 3.4.2 交流双速拖动系统工作原理

交流双速电梯采用变极调速的电动机作为曳引电动机,从电动机结构看,有采用单绕组改变接线方式实现变极的,也有采用双组绕组的,它们各自具有不同的极数,通过接通不同的绕组来实现不同的转速。

在电梯控制线路中,快速绕组用于启动。启动时为了减小(限制)启动电流,减小电网电压的波动以及启动时的加速度,改善启动舒适感并防止机械冲击,一般在定子绕组中串入电阻或电抗进行启动,通过减小串联在高速绕组中的电阻或电抗、最后短路该电阻或电抗而使电动机达到额定速度。

低速绕组用于低速运行,当电梯减速时,切断高速绕组电源,同时给低压绕组供电。为了防止减速时制动电流和减速度冲击过大,通常在低速绕组中也串入电阻或电抗。在减速时逐级短接电阻或电抗。

图3.17是交流双速电梯的拖动系统的结构原理图。图3.17中的三相交流感应电动机定子内共有两个不同极对数的绕组:6极和24极。快速绕组(6极)用作启动和稳速,而低速绕组(24极)用作制动减速和慢速平层停车。另外,图中电路采用一级串电抗启动,二级串电抗电阻减速。电梯启动时,上行或下行接触器KMS和KMX主触点吸合,同时,快速接触器KKC主触点吸合,串入电抗LH1,电动机降压启动,经一段时间后接触器KM1吸合,

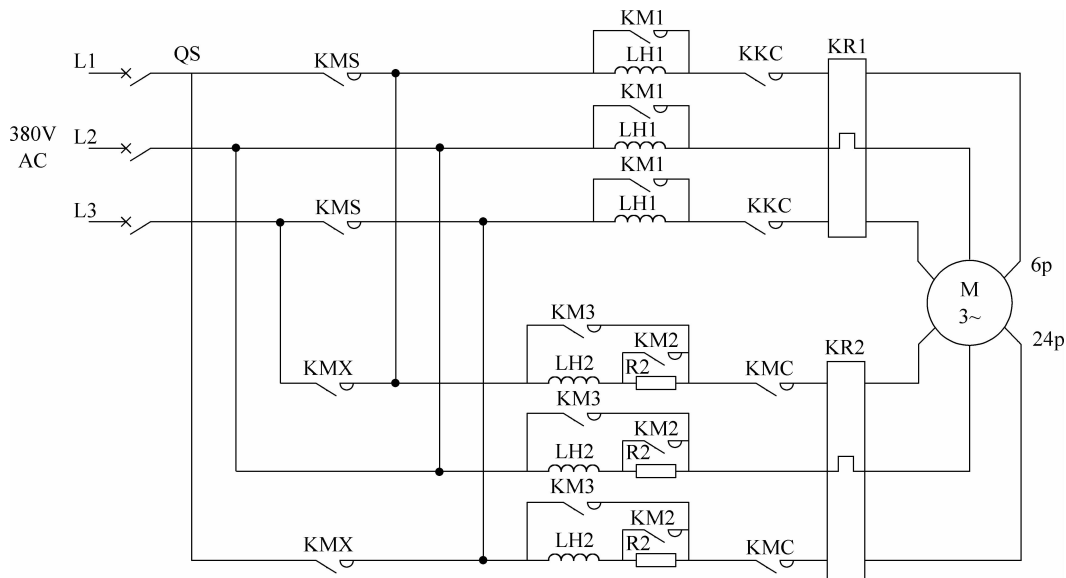


图 3.17 交流双速电梯拖动系统主电路

短接电抗 LH1, 电动机转入自然特性运转, 电梯以额定速度运行。电梯减速制动时, 快速接触器 KKC 主触点释放, 慢速接触器 KMC 主触点吸合。电动机慢速绕组首先串入电抗 LH2 和电阻 R2 运行, 延时一段时间后, KM2 吸合, 短接电阻 R2, 电动机仅串入电抗 LH2 运行, 再延时一段时间, 使 KM3 主触点吸合, 短接电抗 LH2, 电动机在慢速自然特性上运行, 直至上行接触器 KMS 或下行接触器 KMX 释放, 电动机停止运转。

交流双速电梯运行时的速度曲线如图 3.18 所示。在电梯控制线路中, 快速绕组用于启动, 电梯启动过程为抛物线—直线形速度曲线。首先, 在  $0 \sim t_{a_1}$  时间段, 在电动机定子绕组中串入电阻、电抗或电阻和电抗组合, 进行降压启动。启动时在快速绕组中串接电抗(电阻、感抗、电抗等), 可以限制启动电流、减小电网电压的波动并减小启动时的加速度, 改善乘坐的舒适感和防止机械冲击。由于电动机的转速不能突变, 因此, 在  $t_{a_1}$  之后, 电梯保持一段匀加速运动以提高运行效率; 随着电动机转速升高, 逐级短接切除电阻或电抗, 使电梯逐步加速, 如图中  $t_{a_2} \sim t_{a_3}$  时间段, 一段时间后, 到  $t_{a_3}$  时刻, 电动机达到了额定转速, 电梯从此进入匀速运行阶段。在启动过程中常采用一级或两级切除电阻、电抗。

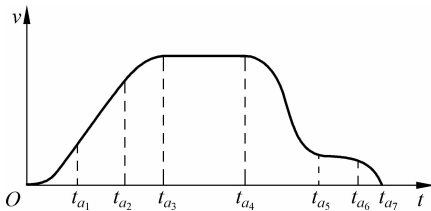


图 3.18 交流双速电梯速度曲线

低速绕组用于低速运行, 当电梯减速时, 先通过高速绕组进行反向加速度比较大的减速, 如图中  $t_{a_4} \sim t_{a_5}$  时间段; 随着电动机转速降低, 电动机由高速绕组转换到低速绕组, 为了限制其制动电流及减速速度, 防止冲击过大, 通常也在低速绕组中串入电阻或电抗, 逐级短接切除电阻、电抗, 电梯进入低速运行段, 如图中  $t_{a_5} \sim t_{a_6}$  时间段; 电梯继续做减速运动, 准确停靠, 同时提高了舒适度, 如图中  $t_{a_6} \sim t_{a_7}$  时间段。

通过调整串接电阻或电抗的大小, 以及控制逐级切除电阻或电抗的时间, 改变其加速度和减速度, 以满足加减速度和舒适感的要求。

交流双速电梯的特点是,在停车前有一个短时间的低速运行,这是为了提高平层精确度而设置的,因为在双速电梯中不采用速度闭环控制,如果由高速直接停梯,轿厢就将冲过一段较大的距离,而这段距离又因电梯的负载情况、运行方向等原因差距很大,例如重载上升(或轻载下降)时冲过的距离相对较小,而重载下降(或轻载上升)时冲过的距离将较大些,这样会造成平层准确度较差,设置一个低速运行段后,停梯前的运行速度大约是额定速度的 $1/4$ ,而运动部分的动能与速度的二次方成正比,速度减少到 $1/4$ ,动能减少到 $1/16$ ,这时再抱闸停车,轿厢冲过的距离将大大减小,在电梯重载上升、轻载下降、重载下降、轻载上升等状况下的差别也将减小,可以保证需要的平层准确度。

### 3.5 交流调压调速拖动系统

交流调速电梯是指在启动加速、稳速运行和减速制动的三个阶段对交流感应曳引电动机进行速度自动调节控制的电梯。这种电梯由于对交流感应电动机在启动、制动过程(尤其是制动过程)进行了速度的自动调节控制,使得到的调速范围 $D$ 值达到20以上,这种电梯的速度可超过 $1\text{m/s}$ ,最大速度可达 $5\text{m/s}$ 。广泛用于中速运行的电梯。

电梯的交流调压调速系统有三种形式:一种是在电梯运行全过程中的调压调速,另一种是在电梯的启动过程和制动过程中实现自动调速,第三种是只在制动过程实现自动调速,如图3.19所示。

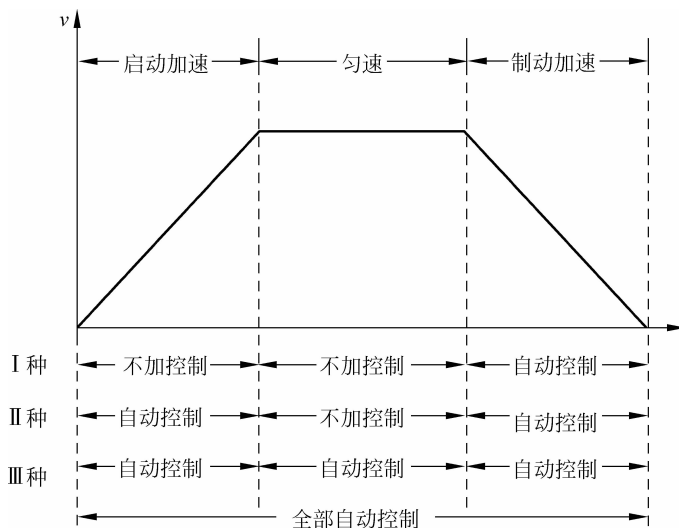


图 3.19 电梯各阶段运行控制

不管何种控制形式的交流调速系统,其制动过程总是要加以控制的。而就其制动过程的控制而言,其制动原理有能耗制动、涡流制动、反接制动等,不论采用哪一种制动原理,其制动原则均是按距离(或模拟按距离)制动的,直接停靠层楼平面,因此,电梯的平层精确度较高。由于无低速爬行时间,从而大大缩短了电梯的运行时间,提高了电梯的输送能力。

### 3.5.1 电梯运行全过程的调压调速原理

图 3.20 所示的是电梯运行全过程的调压调速系统,系统的电动机采用单绕组单速交流异步电动机。电动机要求具有较硬的机械特性和恒力矩输出特性,使用可控硅调压下的非正弦波调速和能耗制动。在图 3.20 中,系统按照基准时间产生完整的速度模型电压,即给定电压(包括启动加速、满速运行,减速制动),另一方面,电梯轿厢的实际速度由速度传感器检测获得,速度传感器一般与电动机同轴安装。速度控制装置将这两个电压进行比较,通过主放大器、触发器控制可控硅的触发角,这些可控硅与电梯电动机的主绕组串接,因而就可对电动机的端电压,即电机转矩进行控制。

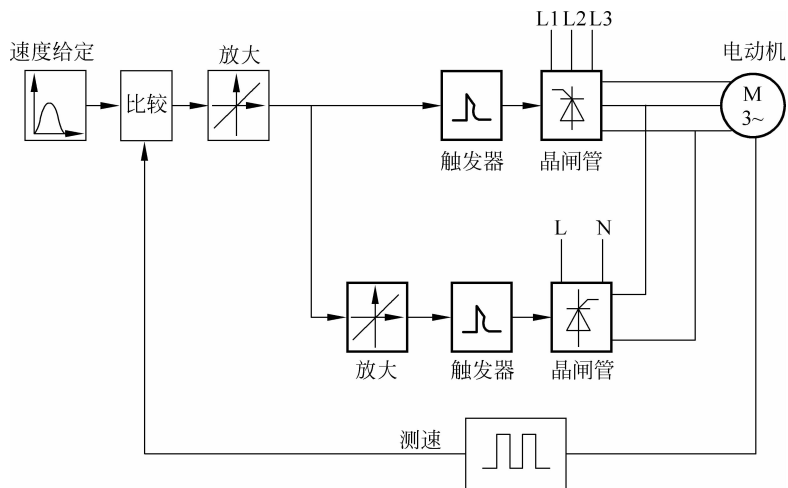


图 3.20 电梯运行全过程的调压调速系统

电梯载荷条件有两种类型：正载荷和负载荷。正载荷时,系统控制电动机产生驱动转矩,负载荷时,系统控制电动机产生动态制动转矩。当控制系统给出减速信号后,模型电压按基准时间下降,半波整流直流电连续流入电动机主绕组,以产生能耗制动,直到电机停止为止。

另外,交流双速电梯也可以用可控硅取代启动、制动电阻和电抗,这样可以控制电动机的启动和制动电流,实现拖动系统的闭环控制,是交流调压调速的又一种形式。这种系统仍采用交流双速电动机,在系统中增加速度反馈装置,电梯运行中实时地检测其运行速度是否符合理想的速度曲线,可以改善交流双速电梯在运行过程中的舒适度。

### 3.5.2 对制动过程进行调速控制的交流调压调速电梯

按电梯的制动方式,交流调压调速电梯可分为能耗制动型、涡流制动型和反接制动型。

#### 1. 能耗制动的交流调速电梯拖动系统

这种系统采用可控硅调压调速,再加上直流能耗制动组成。能耗制动是为了使运转中的电动机按要求停止,在定子两相绕组中通以直流电流,在定子内形成一个固定磁场。当转子由于惯性仍在旋转时,其导体切割此磁场,在转子中产生感应电势及转子电流,使定子电流产生制动转矩。

交流双速电梯的最大缺点是舒适感较差,特别在 1m/s 的双速梯上,减速舒适感差是一个尤为突出的问题,采用能耗制动可以较好地解决这个问题。这种系统采用开环启动、运行。而减速时断开交流电源,在定子绕组某两相中通入直流电,利用可控硅控制电流的大小,同时将系统接成闭环,根据轿厢距离平层位置的距离及速度调节制动电流直至平层。其电路原理如图 3.21 所示,启动运行时 KKC 吸合,快速绕组通入三相交流电源,减速时 KKC 释放,KMC 吸合,经可控硅半控桥式整流线路,使电动机慢速绕组通入直流电进行能耗制动,调速系统原理图如图 3.22 所示。有轿内或层门呼唤时,控制装置使主开关接触器接通,电动机运转,电梯开始运行。轿厢到达减速位置时,根据轿厢与平层位置的距离得出速度指令曲线,这种方式称为按位置控制。控制装置使速度指令开始工作。速度指令与测速机的反馈速度做比较后,按其差值,移相器触发可控硅,调节能耗制动电流的大小,反馈速度越高,与指令的偏差越大,制动电流也越大。最后轿厢平稳地平层。速度零检测装置测得电梯速度为零时,控制装置将主电路接触器释放,断开电动机电源,同时制动器抱闸。

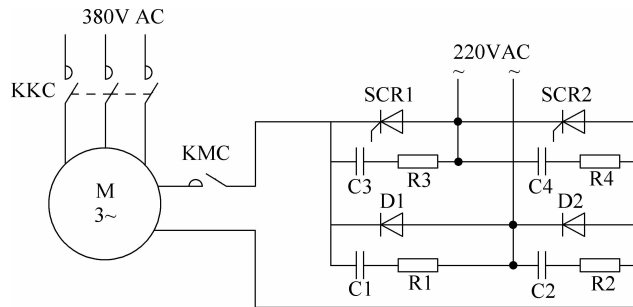


图 3.21 能耗制动原理电路

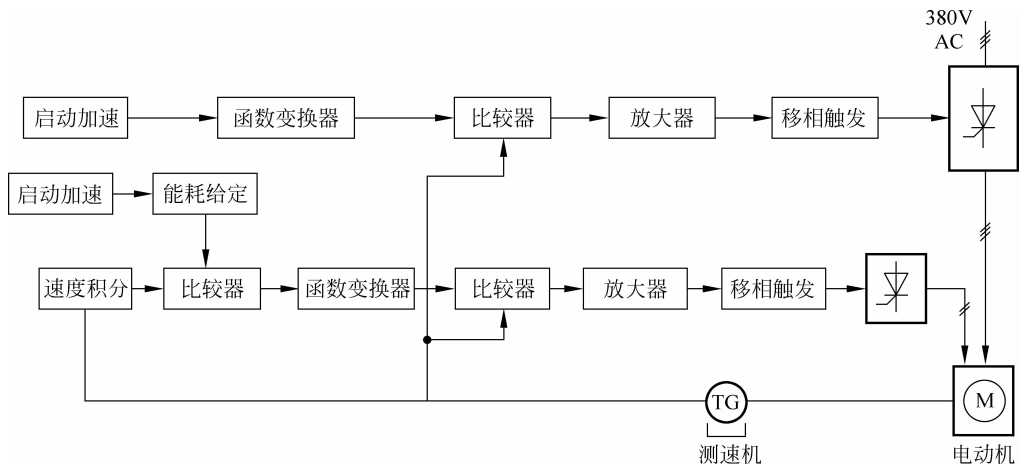


图 3.22 能耗制动交流调速系统原理

## 2. 涡流制动的交流调速电梯拖动系统

涡流制动器通常由电枢和定子两部分组成。电枢和异步电动机的转子相似,其结构可以是笼型,也可以是简单的实心转子。定子绕组是由直流励磁的。涡流制动器在电梯中使用,或与电梯的主电机共为一体,或与电动机分离,但两者的转子是同轴相连的。因而它

具有可调节制动转矩的特性。当电梯运行中需要减速时,则断开主电机电源,而给同轴的涡流制动器的定子绕组输入直流电源以产生一个直角坐标磁场。由于此时涡流制动器转子仍以电动机的转速旋转,并切割定子产生磁力线,这样在转子中产生并分布与定子磁场相关的涡流电流,而这个涡流电流所产生的磁力线与定子的磁力线相互作用,产生一个与其转向相反的涡流制动转矩。按照给定的规律输给涡流制动器定子绕组直流电流,就可控制涡流制动器转矩的大小,从而也就控制了电梯的制动减速过程。

图 3.23 是一种利用涡流制动器控制的交流调速系统的原理图。该系统开环分级启动,开环稳定运行至减速位置时,由井道内每层的永磁体与轿厢顶上的双稳态开关相互作用而发出减速信号,一方面使曳引电动机撤除三相电源,另一方面给与电动机同轴的涡流制动器绕组输入可控的直流电流,使其产生相应的制动力矩,从而令电梯按距离制动减速直至停靠,准确停靠在所需的层站。

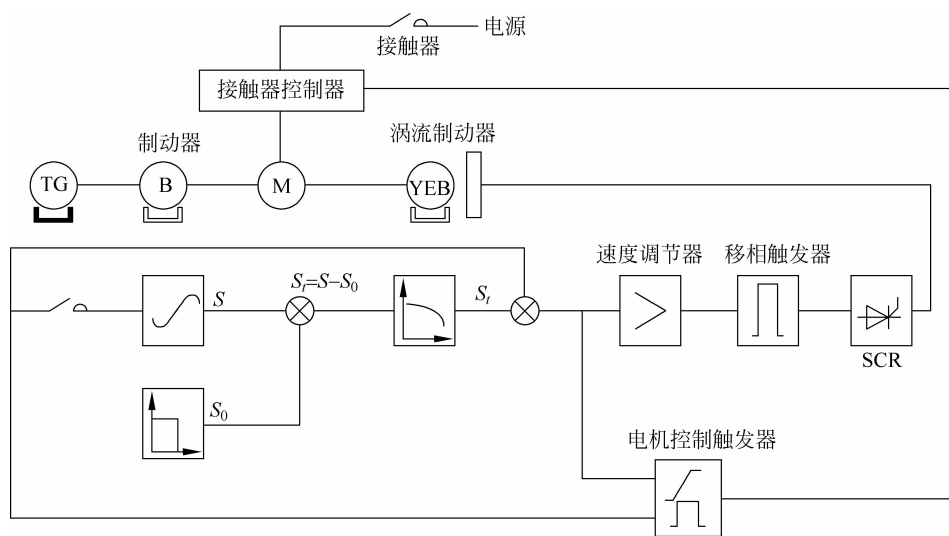


图 3.23 有涡流制动控制的交流调速拖动系统原理

按距离制动减速的原理如下:根据不同电梯的额定速度,有一个事先设定的减速距离  $S_0$ ,则电梯瞬时距楼层平面处的距离  $S$  应为预定距离  $S_0$  减去正在进行的路程  $S_1$ ,即

$$S = S_0 - S_1 = S_0 - \int v(\tau) d\tau \quad (3.59)$$

而现在需要的是速度量,因此将所得到的  $S$  进行均方根处理,即  $v = \sqrt{2aS}$ ,其中  $a$  为设定的平均减速度值。将这一瞬时速度量作为涡流制动器的给定量。随着距离  $S$  的减小,其制动强度也相应减小,直到准确停车为止。制动减速过程不仅随距离的减小而减弱,而且这一过程是转速反馈的闭环系统控制过程,从而可改善控制的质量和精度。

这种系统结构简单、可靠性高。由于控制是通过控制涡流制动器内的电流来实现的,因此,被控对象只是一个电流。这样的控制不仅容易做到,而且其稳定性好。另外,在制动减速时电动机撤出电网,借涡流制动器把系统所具有的动能消耗在涡流制动器转子的发热上。因此电梯系统从电网获得的能量低于其他系统,一般减少 20% 左右。但由于是开环启动的,因此启动的舒适感不是最理想的,其额定速度也只能限制在 2m/s 以下。

### 3. 反接制动的交流调速电梯拖动系统

反接制动也是电梯的一种制动调速方法。只要在一般交流双速感应电动机中,电梯在减速时,把定子绕组中的两相交叉改变其相序,使定子磁场的旋转方向发生改变,而转子的转向仍未改变,这样,电机转子逆磁场旋转方向旋转,产生制动力矩,使转速逐渐降低,此时电机以反相序运转于第Ⅱ象限。当转速下降到零时,需立即切断电机电源,抱闸制动,否则电机会自动反转。

图 3.24 是一种反接制动的交流调速电梯的拖动系统原理图。该系统的电动机仍可用交流双速感应电动机。启动加速至稳速以及制动减速均是闭环调压调速,且高低速分别控制。但在制动减速时,将低速绕组接成与高速绕组相序相反的状态,使之产生制动转矩亦即反接制动。与此同时,高速绕组的转矩也在逐渐减弱,从而使电梯按距离制动并减速直至停靠。

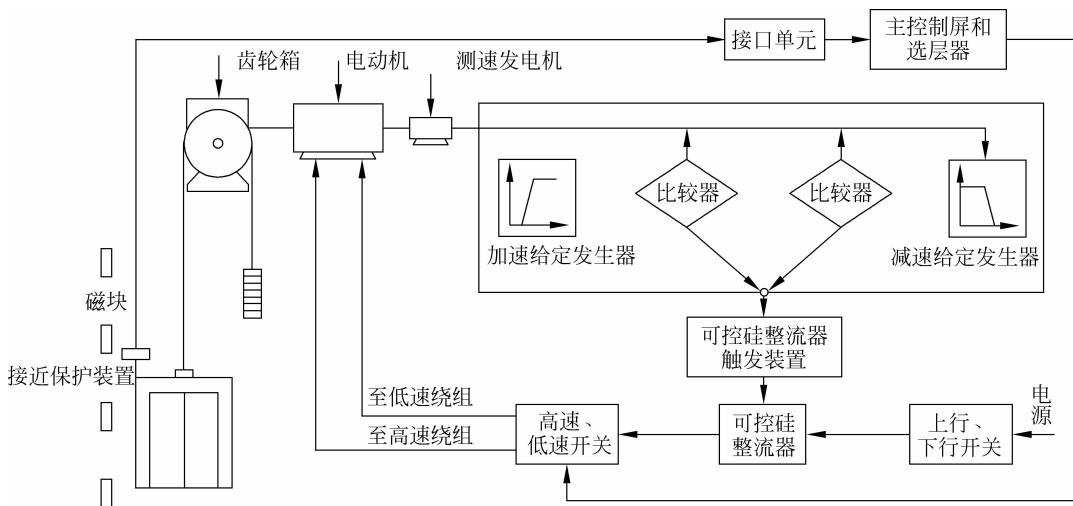


图 3.24 反接制动的交流调速电梯的拖动系统原理

这种系统是全闭环调压调速系统,运行性能良好。由于采用反接制动方式使电梯减速,因此,对电梯系统的惯性矩要求不高,不像前面的涡流制动或能耗制动系统那样,要求电梯有一定数量级的惯性矩,这样使得机械传动系统结构简单、轻巧。另外在制动减速时,高速绕组不断开,而仅在低速绕组上施加反相序电压(即反接制动),因此该系统的动能全部消耗在了电动机转子的发热上,能量消耗较前述几个系统都大,故电动机必须要有强迫风冷装置,这也是该系统的主要缺点。虽然这种反接制动的交流调速电梯有能耗大的不足之处,但其运行性能良好,仍较多地应用于额定速度不大于 2m/s 的电梯上。

## 3.6 交流变频调速电梯拖动系统

目前,交流变频变压调速已在快速和高速电梯上普遍应用,它的各方面技术要求和性能指标均比交流双速和交流调压调速优越。由于交流变频变压调速的技术日趋成熟和完善、工艺先进而简明、故障率低、价格便宜,故当今的电梯技术和电梯市场,已逐步由 VVVF 系统的电梯所占据。

根据交流电动机的转速公式(3.57)可知,如果均匀改变交流感应电动机定子供电频率

$f$ ,则可平滑地改变电动机的同步转速。在许多场合,为了保持调速时电动机的最大转矩不变,需要维持磁通恒定,这时就要求定子的供电电压做相应调整,因此,电动机的变频器一般都要求兼有调压和调频两种功能。变频变压调速(简称VVVF)就是通过改变交流感应电动机供电电源的频率而调节电动机的同步转速,使转速无级调节。这种变频变压调速方法的调速范围较大,是较合理的交流电动机调速方法。也就是说是通过改变施加于电动机进线端的电压和电源频率来调节电动机的转速的。使用变频器进行调速的电梯称为VVVF型电梯。

根据电动机和电梯为恒转矩负载的要求,电梯的变频变压调速系统在变频调速时需保持电机的最大转矩不变,维持磁通恒定,这就要求定子绕组供电电压也要做相应的调节。因此,其电动机的供电电源的驱动系统应能同时改变电压和频率,即对电动机供电的变频器要求有调压和调频两种功能。

变频器一般采用的是交—直—交工作原理,即先将三相交流电源电压整流得到幅值可变的直流电压,然后经开关元器件(大功率晶体管或IGBT)轮流切换导通,既可获得幅值和频率均可变化的交流输出电压,其幅值由整流器输出的直流电压所决定,其频率由逆变器的开关元件的切换频率所决定。为了提高电网的功率因数,一般采用带有脉宽调制(简称PWM)功能的逆变器来调频、调压。

### 3.6.1 变频器分类

#### 1. 按照变频器主电路工作方式分类

按照变频器主电路工作方式,变频器分为电压型和电流型两类。

电压型变频器由整流电路或斩波电路产生逆变电路所需要的直流电压,并通过直流中间电路的电容进行平滑后输出。整流电路和直流中间电路起直流电压源的作用,而电压源输出的直流电压在逆变电路中被转换为具有所需频率的交流电压。

在电压型变频器中,由于能量反馈给直流中间电路的电容,并使直流电压上升,还需要有专用的放电回路,避免由于电压过高而损坏换流器件。

电流型变频器由整流电路给出直流电流,并通过中间电路的电抗器将电流进行滤波,平滑输出。整流电路和直流中间电路起电流源的作用,而电流源输出的直流电流在逆变电路中被转换为具有所需频率的交流电流,并被分配给各相输出,作为交流电流提供给交流电动机。在电流型变频器中,电动机的定子电压的控制是通过检测电压对电流进行控制的方式来实现的。

对于电流型变频器来说,在电动机进行制动的过程中,可以通过将直流中间电路的电压反向的方式使整流电路变为逆变电路,并将负载的能量反馈给电源。由于在采用电流控制方式时,可以将能量反馈给电源,而且在出现负载短路等故障时也更容易处理,因此,电流型控制方式更适合大容量变频器。

#### 2. 按照变频器逆变电路的开关方式分类

按照变频器逆变电路的开关方式,变频器分为PAM控制、PWM控制和高载波频率PWM控制。

采用PAM(Pulse Amplitude Modulation,脉冲振幅值调制)控制的变频器是一种在整流电路部分对输出电压(电流)的幅值进行控制,而在逆变电路部分对输出频率进行控制的控制方式。在PAM控制的变频器中,因为逆变电路换流器件的开关频率即变频器的输出

频率,所以,这是一种同步调速方式。由于逆变电路换流器件的开关频率(简称为载波频率)较低,在使用PAM控制方式的逆变器进行调速驱动时,具有电动机运转噪音小和效率高等优点。但是,由于这种控制方式必须同时对整流电路和逆变电路进行控制,控制电路比较复杂。另外,这种控制方式使电动机低速运转时波动较大。

PWM(Pulse Width Modulation,脉冲宽度调制)是在逆变电路部分同时对输出电压(电流)的幅值和频率进行控制的控制方式。在这种控制方式中,以较高频率对逆变电路的半导体开关元件进行开闭,并通过改变输出脉冲的宽度来达到控制电压(电流)的目的。为了使异步电动机在进行调速运转时能够更加平滑,目前在变频器中多采用正弦波PWM控制方式。所谓正弦波PWM控制方式指的是通过改变PWM输出的脉冲宽度,使输出电压的平均值接近于正弦波。这种控制方式也被称为SPWM控制。

采用PWM控制方式的变频器具有可以减少高次谐波带来的各种不良影响,转矩波动小,而且控制电路简单和成本低等优点。但是,该控制方式也存在当载波频率不合适时,会产生较大的电动机运转噪声的缺点。为了解决这个问题,在采用PWM控制方式的新型变频器中,都设计有一个可以改变变频器载波频率的功能,以便使用户可以根据实际需要来改变变频器的载波频率,从而达到降低电动机运转噪声的目的。

采用高载波频率PWM控制的变频器是对PWM控制方式的改进,是为了降低电动机运转噪声而采用的一种控制方式。在这种控制方式中,载波频率被提高到人耳可以听到的频率(10~20kHz)以上,从而达到降低电动机运转噪声的目的。由于这种控制方式对换流器件的开关速度有较高的要求,所用换流器件只能使用具有较高开关速度的IGBT或MOSFET等半导体元器件,这将使大容量变频器的生产受到一定的限制。但是,随着电力电子技术的发展,具有较高开关速度的换流器件的容量将越来越大,所以,采用这种控制方式的变频器也将越来越多。

PWM控制和高载波频率PWM控制都属于异步调速方式,即变频器的输出频率不等于逆变电路换流器件的开关频率。

### 3. 按照变频器工作原理分类

按照变频器工作原理,变频器分为电压和频率比控制变频器,转差频率控制变频器和矢量控制变频器。

电压和频率比( $U/f$ )控制是一种比较简单的控制方式。它的基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制,通过使 $U/f$ 的值保持不变而得到所需要的转矩特性。采用 $U/f$ 控制方式的变频器控制电路成本较低,多用于对精度要求不太高的通用变频器。

转差频率控制方式是对 $U/f$ 控制的一种改进。在采用转差频率控制的变频器中,电动机的实际速度由安装在电动机上的速度传感器和变频器控制电路得到,而变频器的输出频率则由电动机的实际转速对应的频率与所需转差频率之和自动设定,从而达到在进行调速控制的同时,控制电动机输出转矩的目的。

转差频率控制利用了速度传感器的速度进行闭环控制,并可以在一定程度上对输出转矩进行控制,所以和 $U/f$ 控制方式相比,在负载发生较大变化时,仍能达到较高的速度精度并具有较好的转矩特性。但是,由于采用这种控制方式时,需要在电动机上安装速度传感器,并需要根据电动机的特性调节转差,所以通常多用于厂家指定的专用电动机,通用性较差。目前,电梯上采用这种类型的变频器较多。

矢量控制是交流电动机的一种理想调速方式。矢量控制的基本思想是将异步电动机的定子电流,分为产生磁场的电流分量(励磁电流)和与其相垂直的产生转矩的电流分量(转矩电流),并分别加以控制。由于在这种控制方式中,必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位,即控制定子电流矢量,故被称为矢量控制方式。矢量控制方式使对异步电动机进行高性能的控制成为可能。采用矢量控制方式的交流调速系统,不仅在调速范围上可以与直流电动机相媲美,而且可以直接控制异步电动机产生的转矩。所以,目前应用在许多需要精密控制的领域。

由于在进行矢量控制时,需要准确地掌握交流电动机的有关参数,所以这种控制方式过去主要用于对厂家指定的变频器专用电动机的控制。随着变频调速理论和技术的飞跃发展以及现代控制理论在变频器中的成功应用,在目前的新型矢量控制变频器中,已经增加了自整定(Auto-tuning)功能。带有这种功能的变频器,在驱动异步电动机进行正常运转之前,可以自动地对电动机参数进行识别,并根据识别结果调整控制算法中的有关参数,从而使得对普通的异步电动机进行有效的矢量控制成为可能。这种新型变频器绝大多数都采用第三代的 IGBT(绝缘栅双极型三极管)半导体器件和无速度传感器矢量控制技术,应用高级的控制算法,设计完善的保护功能,使交流电动机在任何速度下,都能获得超常的转矩和低噪声、高效率、平稳的运行。

### 3.6.2 交流变频变压调速(VVVF)系统原理

图 3.25 是一个中、低速电梯驱动系统的结构原理图。其 VVVF 驱动控制部分由三个单元组成:第一单元是根据来自速度控制部分的转矩指令信号,对应供给电动机的电流进行运算,产生出电流指令运算信号;第二单元是将经数/模转换后的电流指令和实际流向电动机的电流进行比较,从而控制主回路转换器的 PWM 控制器;第三单元是将来自 PWM 控制部分的指令电流供给电动机的主回路控制部分。

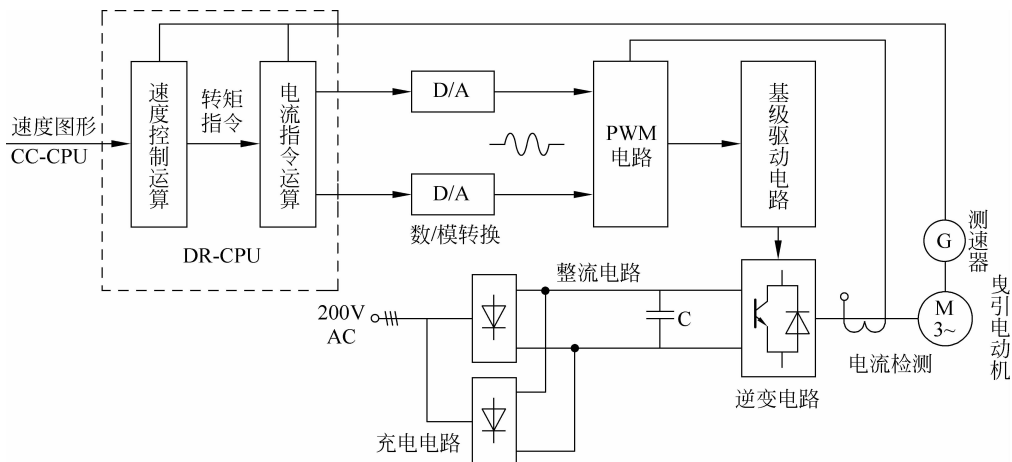


图 3.25 中、低速 VVVF 电梯拖动系统结构框图

主回路部分由下列部分构成:

(1) 将三相交流电变换成直流的整流器部分。

(2) 平滑直流电压的电解电容器。

(3) 电动机制动时,再生发电的处理装置以及将直流转变成交流的大功率逆变器部分。

当电梯减速时以及电梯在较重的负荷下(如空载上行或重载下行)运行时,电机将有再生电能返回逆变器,然后用电阻将其消耗,这就是电阻耗能式再生电处理装置。高速电梯的VVVF装置大多具有再生电返回装置,因为其再生能量较大,若用电阻消耗能量的办法来处理,势必将使再生电处理装置变得很庞大。

基极驱动电路的作用是放大来自正弦波 PWM 控制电路的脉冲列信号,再输送至逆变器的大功率晶体管的基极,使晶体管导通。另外,在减速再生控制时,先将主回路大电容的电压和充电回路输出电压与基极驱动电路比较,经信号放大,再来驱动再生回路中大功率晶体管的导通以及主回路部分的安全回路检测。

图 3.26 是一种高速电梯的 VVVF 控制装置原理图。三相交流电压被晶体管整流器及输入侧的交流电抗器变换成直流电压,晶体管逆变器再将它变换成可变电压、可变频率的三相交流电压,供给交流感应电动机。整流器和逆变器均采用高压大容量的大功率晶体管模块,由于采用正弦波输出脉冲宽度调制(SPWM),所以其输入电流和输出电流均为正弦波。

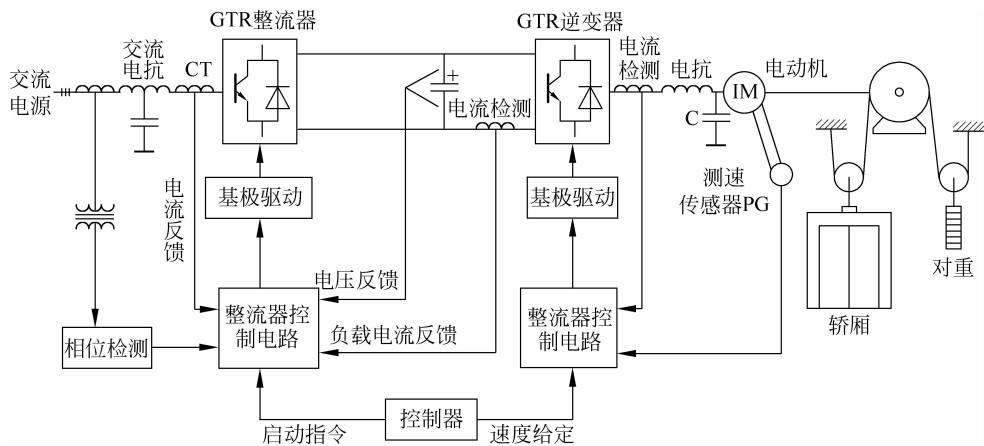


图 3.26 高速电梯用的 VVVF 控制装置原理

交流感应电动机在 VVVF 调速系统中,虽然在保持电动机转矩为常数、磁通为常数的情况下可以获得良好的转速调节性能,但是,这种特性都是在静态情况下理论推导出来的,没有考虑到动态时电磁惯性的影响,尤其是电梯负载在运行过程中受到外来因素扰动的影响,这些都能导致交流电动机转矩的变化,也就是,能使所引起的转速降低和其相对应的响应时间增加。而在直流电动机中就没有这个问题。因此,人们就设想在交流电动机中尽可能地模拟直流电动机中的电磁转矩产生的规律,这样,就在交流电动机传动技术上提出和应用矢量变换控制调速的概念。一般的 VVVF 电梯的调速系统性能对于高速电梯系统来说仍不能满足动态或运行过程中受到外来因素扰动等情况下的要求,例如运行中遇到导轨的接头台阶,安全钳动作后的导轨表面拉伤、变形、门刀碰撞门锁滚轮而引起的瞬间冲击等,都有可能引起交流电动机中电磁转矩的变化,从而影响电梯的运行性能。使用带有矢量变换控制的变频变压调速系统能使高速(甚至超高速)电梯充分满足系统的动态调节要求。

图 3.27 是一种把逆变器装置及矢量控制系统应用于高速电梯拖动系统的原理图。图中 ASR 为自动速度调节器, ACR 为自动电流调节器, TA 为电流转换器, L1、L2 为电抗器。

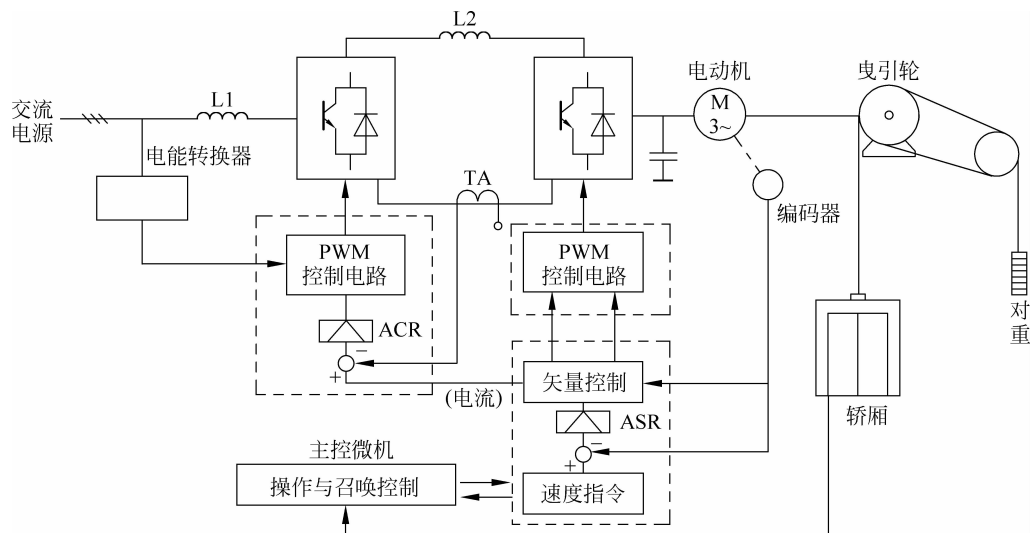


图 3.27 有逆变器及矢量系统的高速 VVVF 电梯拖动系统原理

实际使用的逆变器能控制满量程, 电机的转矩脉动动量包括了 1Hz 或 1Hz 以下的频率范围, 使电梯乘坐舒适, 平层精度好。为了减小电动机的电磁噪声, 大功率变换器还需用高频载波器控制。

## 3.7 永磁同步电动机拖动系统

### 3.7.1 永磁同步电动机的结构

永磁同步电动机的磁极结构形式随着永磁材料性能的不同、应用领域的差异, 具有多种方案。永磁电动机中较多地采用了铁氧体, 它的矫顽力较大, 而剩磁通密度较小, 磁极形状需要做成扁平式, 这种磁极的界面大, 而长度比较短; 为了便于把永磁体固定在转子上, 铁氧体永磁同步电动机的转子常采用图 3.28(a) 所示的结构; 在采用稀土永磁体的电动机中, 由于稀土永磁材料的磁能积很大, 矫顽力和剩磁密度都较高, 往往只要一片磁体即能满足产生电动机磁场的要求; 因此, 在稀土永磁电动机中, 永磁体常做成瓦片式(薄片式)贴在转子的表面, 或嵌在转子铁芯中; 图 3.28(b) 为内转子式永磁同步电动机磁极结构, 永磁体嵌在铁芯中; 图 3.28(c) 为外转子型, 永磁体贴在转子的内表面上。

稀土永磁同步电动机的定子为三相对称绕组, 与三相异步电动机结构相同。转子上粘有钕铁硼磁钢。逆变器输出的频率、电压可变的三相正弦波电压在定子三相绕组中产生对称三相正弦波电流, 并在气隙中产生旋转磁场。这个旋转磁场与已充磁的磁极作用, 驱动转子与旋转磁场同步旋转并力图使定子、转子磁场轴线对齐。在这种永磁同步电动机转轴的非负载端嵌装有检测永磁体磁极位置信号及实现电子换向的传感器。当定子绕组接上可控的变频变压电源启动运行后, 由磁极位置信号控制同步电动机定子绕组电流相位, 确保转子磁场方向与定子绕组电流矢量在空间正交。由于转子上没有电流, 电动机的发热状况只取决

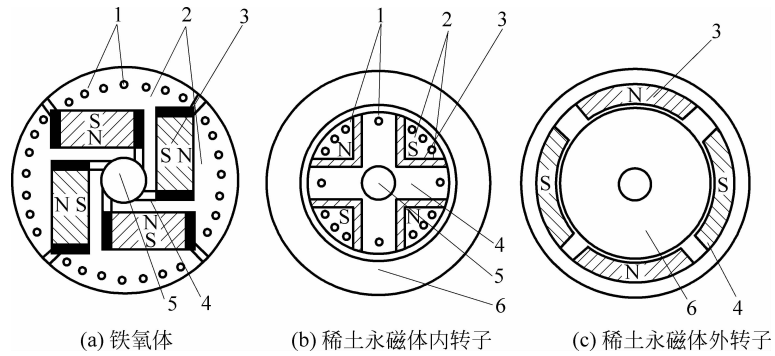


图 3.28 新型永磁体同步电动机转子结构

1—启动笼；2—极靴；3—永磁体；4—转子轭；5—转轴；6—定子

于定子绕组电流的大小。也由于永久磁体产生的恒定磁场总与可控制的定子电流正交，因此电磁转矩和定子电流具有线性比例关系。

### 3.7.2 永磁同步电动机的控制方式

由于永磁同步电动机的磁场不能随意调节，加上各种材料性能、成本的差别较大，其结构形式很多，参数差别也很大。图 3.29 中所示的三种不同转子磁极结构的永磁同步电动机，其直轴和交轴电感之比  $\rho = L_q/L_d$  分别为 0.5、1.0、5.13，差别很大，高达 10 倍以上，所以永磁同步电动机的控制策略不但与一般同步电动机有所不同，而且就是永磁同步电动机内部，也因结构和参数的不同，其控制方法有所差别。

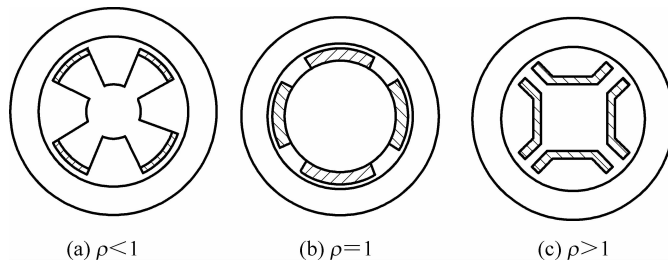


图 3.29 不同永磁同步电动机磁极结构

对于某种特定的电动机究竟采用什么控制方式比较合适，一般根据电动机转矩和电流之间关系的线性度、控制工程中电动机端电压的允许变化程度、功率因数和电枢反应的去磁效应 4 个方面的因素进行综合比较后判断确定。永磁同步电动机的控制方式一般说来有下列 4 种：

(a)  $I_d = 0$  控制方式。永磁同步电动机的相量图可以用图 3.30(a) 表示，图中  $\phi_f$  是永磁体产生的磁链，由  $\phi_f$  引起的电动势为  $E_0$ ，电动机负载运行时电枢电流为  $I$ ， $I$  可以分解成 d 轴分量  $I_d$  和 q 轴分量  $I_q$ ，d 轴分量  $I_d$  产生去磁磁动势，引起磁链  $\phi_{ad}$ ，q 轴磁动势引起磁链  $\phi_{aq}$ ，这时电动机合成磁链为  $\phi_m$ ， $\phi_m$  引起的电动势为  $E_m$ ， $E_m$  也可以看作是  $E_0$  与  $\phi_{ad}$  产生的电动势  $jI_d x_d$  及  $\phi_{aq}$  产生的电动势  $jI_q x_q$  之和，由  $E_m$  加上电枢绕组的压降  $U_r$  就得到电动机的端电压  $U$ ，图中  $U$  与  $E_0$  的夹角  $\delta$  为同步机的功角， $U$  与  $I$  的夹角  $\theta$  为功率因数角， $\gamma_0$  是电枢电流与 q 轴的夹角。

如果控制逆变器的导通相位使  $\gamma_0 = 0$ ，则  $I_d = 0$ ，电枢电流没有励磁分量，图 3.30(a) 中

的  $\psi_{ad}$  为零, 不会引起永磁电动机退磁现象; 此时的同步电动机相量图如图 3.30(b) 所示。这时, 电动机的电枢反应只存在于交轴(即  $q$  轴), 功角和电动机端电压均随负载增加而增加。这种方法曾广为采用, 这种控制方案要求逆变器的输出电压高, 容量比较大。

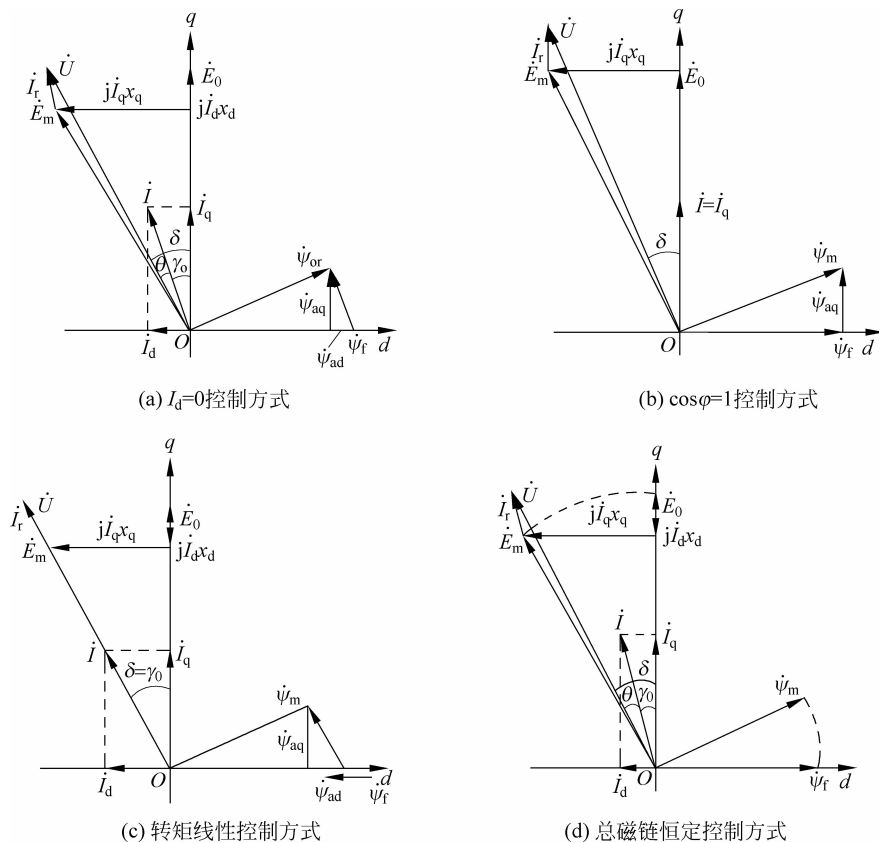


图 3.30 永磁同步电动机的相量图

(b)  $\cos\varphi=1$  控制方式。这种控制方式中, 功率因数始终保持为 1, 它是通过控制  $\gamma_0$  角, 使  $\gamma_0=\delta$  来实现的。此时电动机的相量图如图 3.30(c) 所示, 电枢电流  $I$  与  $\gamma_0$  角之间应保持如下关系:

$$I = \frac{\sin\gamma_0}{\sin^2\gamma_0 + \rho\cos^2\gamma_0} \frac{\psi_f}{L_a} \quad (3.60)$$

在永磁同步电动机中, 由于转子励磁不能调节, 在负载变化时, 电枢绕组的总磁链无法保持恒定, 所以电枢电流和转矩之间难以保持线性关系。

(c) 转矩线性控制方式。为了在永磁电动机中能够获得电磁转矩和电流之间的线性关系, 应满足以下所列条件:

$$I = \frac{2(1 - \cos\gamma_0)}{(\rho - 1)\sin 2\gamma_0} \frac{\psi_f}{L_a} \quad (3.61)$$

这时, 电动机的电磁转矩与电枢电流成正比 ( $T_{em} \propto I$ ), 电动机有较好性能。

(d) 总磁链恒定控制方式。在电动机运行过程中始终保持电动机内电枢电流与永磁体的合成磁动势引起的磁链  $\psi_m$  大小不变, 即  $\psi_m = \psi_f$ , 因而电枢绕组电动势  $E_m$  保持不变, 即

$E_m = E_0$ , 从而使电动机的端电压基本保持恒定, 见图 3.30(d)。

### 3.7.3 永磁同步电梯的驱动系统原理

永磁同步电动机没有励磁绕组, 因此节省了励磁供电电路, 省去了同步电动机的电刷—集电环装置, 使电动机结构紧凑、体积减小、效率提高。永磁同步电动机的主电路就是对定子三相绕组供电的电路, 其电路主要有图 3.31 所示的两种形式。

图 3.31(a) 是一个采用功率晶体管(或 IGBT)组成变频器向同步电动机供电的主电路, 为提高系统性能, 通常采用矢量控制方式进行控制。

图 3.31(b) 是一个采用晶闸管组成变频器向同步电动机供电的主电路, 在这种供电方式下, 通常采用自控式变频方式进行控制。在这种控制方式下, 控制系统不断地检测转子位置, 在自然换流点之前,  $\gamma$  角( $\gamma$  角被称作换流超前角)触发需要导通的晶闸管, 利用电动机的反电动势来关断应退出的晶闸管, 实现晶闸管之间的换流。这样就不需要设置晶闸管的关断电路, 使得控制电路结构简单。在自控式方式下, 同步电动机不会失步, 工作比较可靠。由于这种方式相当于直流电动机的供电, 因此把这样的系统称作无换向器(直流)电动机。无换向器电动机多用于大功率场合。

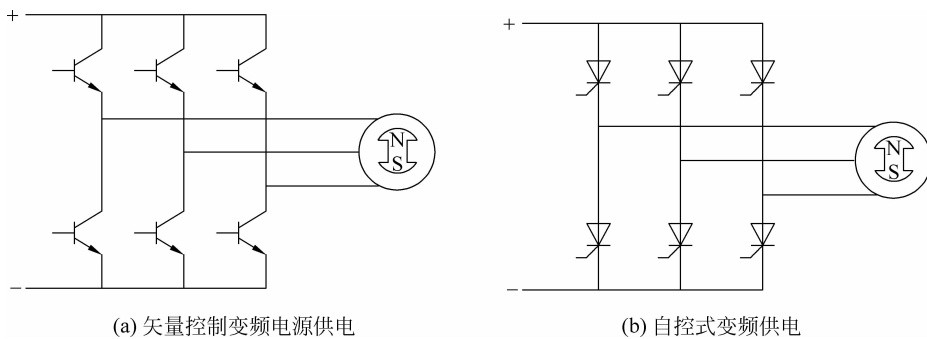


图 3.31 永磁同步电动机的主电路图

采用永磁同步电动机的电梯曳引系统通常为无齿轮曳引方式, 这样可以充分发挥永磁同步电动机易于做成低转速、大功率的优点。永磁同步无齿曳引机驱动控制系统原理图见图 3.32, 与异步电动机变频调速系统相比, 当负载变化时, 异步电动机通过调整转差来适应, 而同步电动机则只是调节功角  $\delta$ , 因此同步电动机响应速度更快, 也因此其控制系统需要有精确的转子位置检测装置和电压电流检测装置, 以便随时确定磁场的大小、方向。转子位置的精确控制是永磁同步无齿轮曳引技术重要部分之一, 它将直接关系到电梯启动、制动的舒适性和平层精确度。

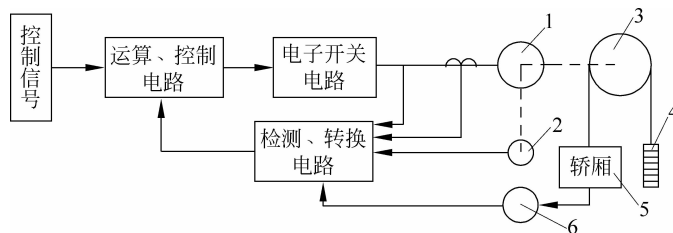


图 3.32 永磁同步无齿曳引机驱动控制系统原理图

1—永磁同步电动机; 2—转子位置传感器; 3—曳引轮; 4—对重; 5—轿厢; 6—轿厢载重传感器

永磁同步电动机转子位置传感器常使用光电编码器和旋转变压器等。光电编码器有增量式和绝对式两种。增量式光电编码器具有结构简单、使用方便等优点,但长期使用容易造成积累误差,停电时由于惯性作用使电动机转子位置信号丢失,所以多用于中、低速电梯。绝对码式光电编码器是按二进制读数设计的,一般需要 8~12 个码道才能得到精确的位置信号。由于编码器从码盘读到的值就是转角信号的二进制输出,由此可直接得到转子的绝对位置。

光电编码器的优点是检测位置操作简单,但容易受电气噪声干扰,而旋转变压器不存在这方面的问题。根据变压器原理,在定子、转子上都装有二相交流绕组。在定子绕组 A 和 B 上分别通以互差  $90^\circ$  的对称电压,则可在其气隙中产生旋转磁场。当转子从基准位置转过  $\theta$  角时,转子 a 和 b 两绕组中分别感应出定子电压超前(或落后) $\theta$  角的电压。测量转子的感应电压和定子的基准电压之间的相位差来判断转子的位置。

轿厢负载检测装置在无齿轮曳引驱动中显得尤为重要,因为系统对电动机的启动力矩要求更高。有齿轮曳引系统的减速机构有较大的传动比,一些低速梯的涡轮蜗杆副还具有自锁功能。无齿轮曳引驱动中电动机和曳引轮同轴,要求曳引启动力矩的输出应力求精确。所以采用具有线性变化规律的轿厢负载检测装置来预先测量并计算,从而可以解决开闸瞬间由于不同负载引起轿厢启动过慢(倒溜)或启动过猛的问题。系统可以预先测量计算给出恰当方向和大小的力矩,使系统运行全过程由被动控制变为主动控制。

负载检测装置有位置型、压力型等多种形式,输出有开关量、模拟量(电压)和频率量(高频抗干扰性强、能远距传送)等。

将上述反馈信号与给定信号相比较、运算,按预定的控制方式加以控制,可以得到优于其他驱动系统的性能。

永磁同步电动机驱动的 VVVF 电梯有如下优点:

(1) 结构简单,运行可靠,电动机转子不需要励磁,省去了线圈或鼠笼,简化了结构,实现了无刷,减少了故障,维修方便简单。

(2) 高效率、节能。它的效率高(可近似为 1),又省去电励磁,减少了定子电流和定子转子电阻的能耗,效率高达  $94\% \sim 96\%$ ,满载启动电流(比交流异步电动机驱动的 VVVF 电梯)减少一半,所以节能效果明显。据实际使用后测试其可节能  $30\%$  以上,同时轻载电流小,只相当于异步电动机的  $10\%$ 。

(3) 调速范围宽,可达  $1:1000$  甚至更高(异步电机只有  $1:100$ ),调速精度高,大大提高了电梯的品质。

(4) 能在额定转速内保持恒转矩,提高了电梯的运行稳定性,可以做到给定曲线与运动曲线重合,特别是电动机在低频、低压、低速时可提供足够的转矩,避免电梯在启动缓速过程抖动,有效改善了电梯制动过程的舒适感。

(5) 电动机满载启动运行时电流不超过额定电流的 1.5 倍,配置的变频器无须提高功率配置,降低了变频器的成本。

(6) 永磁同步电梯的电动机反向电势可以设计成正弦波,实现了低损耗、低振动、低噪声,符合环保的要求。

(7) 采用永磁同步电动机作为曳引机的电梯,若因制动器失效而发生电梯轿厢和对重装置处于自由状态时,由于永磁同步电动机的结构及永磁体的作用,使轿厢或对重可能发生的溜车速度大大降低,引发的事故损失也相对减小。

(8) 永磁同步曳引机无需润滑油,避免了传统曳引机齿轮油可能渗透而造成的环境污染。

## 复习思考题

- (1) 评价电梯运行舒适度的物理量是什么?这个物理量对电梯的运行效率有什么影响?
- (2) 电梯速度运行曲线的作用是什么?
- (3) 简述三角形速度运行曲线的特点。
- (4) 简述梯形速度运行曲线的特点。
- (5) 简述抛物线—直线速度运行曲线的特点。说明加速度与舒适度之间的关系。
- (6) 当抛物线—直线速度曲线的直线段运行时间为 0 时,这种运行曲线变为抛物线速度运行曲线,抛物线速度运行曲线有哪些优缺点?要获得最佳的舒适度,加速度如何选择?
- (7) 简述正弦速度运行曲线的特点。
- (8) 电梯为什么要采用分速度运行?以抛物线—直线速度曲线为例,简述分速度运行的原理。
- (9) 简述电梯拖动系统的分类。
- (10) 直流电梯有哪些特点?
- (11) 直流电梯调速通常采用哪几种方法?
- (12) 试比较发电机组供电的直流电梯与晶闸管整流器供电的直流电梯的优缺点。
- (13) 简述直流发电机—电动机电梯拖动系统的工作原理。
- (14) 简述可控硅励磁的发电机—电动机拖动系统的工作原理。
- (15) 直流高速电梯速度自动调节系统有哪些特点?
- (16) 简述可控硅直接供电的直流拖动系统的工作原理。
- (17) 对于交流拖动系统来说,实现电动机转速调节有几种途径?
- (18) 简述图 3.17 交流双速电梯的工作原理。如果电梯供电电源的相序发生了改变,图 3.17 的电路工作状态将如何变化?
- (19) 简述电梯运行全过程的调压调速系统的工作原理。
- (20) 简述能耗制动的交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (21) 简述涡流制动的交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (22) 简述反接制动的交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (23) 电压型和电流型变频器有什么不同?
- (24) PAM 和 PWM 控制的变频器在工作原理上有哪些不同?
- (25) 简述转差频率控制变频器的工作原理。
- (26) 简述矢量控制变频器的工作原理。它与转差频率控制变频器相比具有哪些优点?
- (27) 简述交流调压调速的工作原理。
- (28) 简述图 3.25 的 VVVF 电梯拖动系统的工作原理。
- (29) 简述图 3.26 的 VVVF 电梯拖动系统的工作原理,它与图 3.25 相比有哪些不同?
- (30) 简述永磁同步电动机的结构与工作原理。
- (31) 简述永磁同步电梯的驱动系统的原理。
- (32) 永磁同步电梯与 VVVF 电梯相比,有哪些主要的优点?