

电梯的电气拖动系统

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。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 1.5m/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 0.5m/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 0.7m/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 5m/s^3 ,一般限制在 1.8m/s^3 以下。如果将它限制在 1.3m/s^3 以下,即使加速度再大一些(即使达到 $2.0\sim 2.5\text{m/s}^2$),也不会使人感到过度不适。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—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,会使乘客产生不舒适感。

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

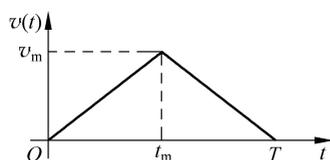
$$T = 2\sqrt{H/a_m} \quad (3.5)$$

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

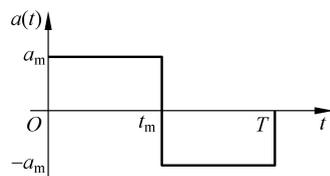
因此,当运行距离 H 一定时,若将加速度 a_m 增加,则最大速度 v_m 会增加,运行时间 T 减小,运行效率更高。

3.1.2 梯形速度曲线

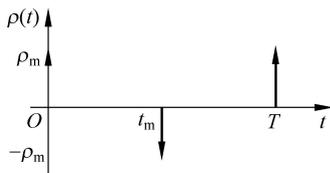
梯形速度曲线如图 3.2 所示,电梯以 a_m 加速度启动加速,当匀加速运动到 t_{a_1} 时,达到最大运行速度 v_m ,再以 v_m 匀速运行到 t_{a_2} ,然后再以 a_m 做匀减速运行,直到零速停靠。



(a) 速度曲线

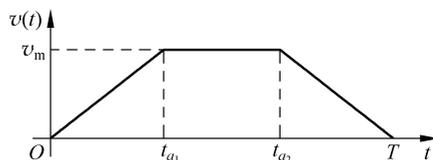


(b) 加速度曲线

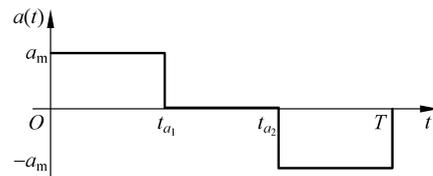


(c) 加速度变化率曲线

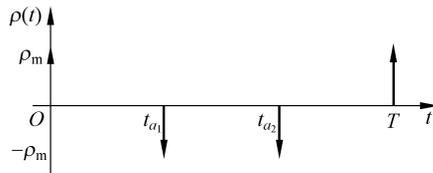
图 3.1 三角形速度曲线



(a) 速度曲线



(b) 加速度曲线



(c) 加速度变化率曲线

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

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

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 0。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,加速度达到最大值;此后,进入匀加速运行段;到 t_{a_2} 时,加速度的变化开始减小,直到 t_{a_3} 时开始进入匀速运行段。 $t_{a_4} \sim T$ 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 。

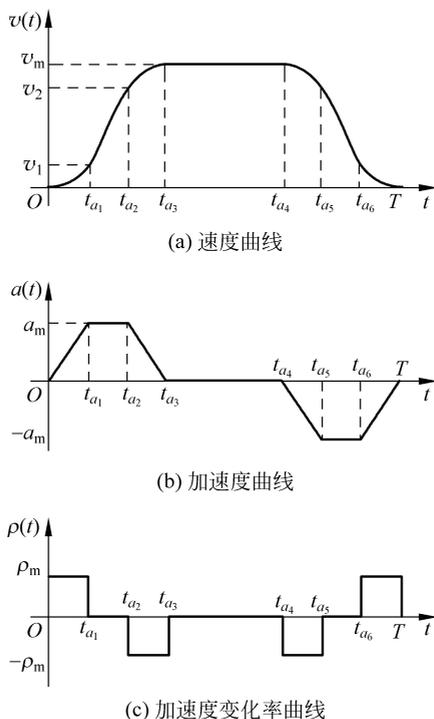


图 3.3 抛物线—直线形速度曲线

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,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)代入式(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,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,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,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 、 ρ_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 ρ_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 ρ_m 一定时,加速度变化率 ρ_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 ρ_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 ρ_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。

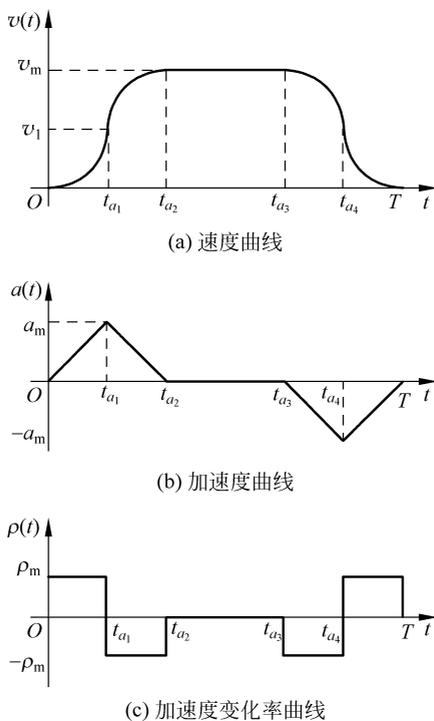


图 3.4 抛物线速度曲线

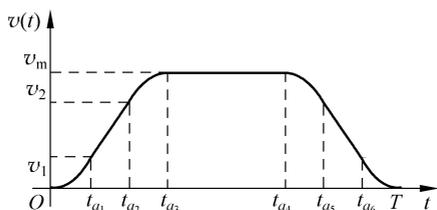
对于抛物线速度曲线,当最大速度 v_m 值较大时,其加速度最大值 a_m 也必然增大。为了改善乘坐舒适感,最大加速度 a_m 值不能大于允许的极限值,而要满足 $v_m \rho_m = a_m^2$, ρ_m 值需要减小。这样,启动加速运行时间 t_a ($t_a = 2t_{a_1} = 2a_m / \rho_m$) 必然延长。抛物线速度曲线克服了梯形速度曲线的缺点,光滑度好,无拐点,改善了电梯运行的舒适感,但在高速和超高速电梯的运行中,启动、制动速度曲线仅为抛物线会使运行效率太低。

在 v_m 和 ρ_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,抛物

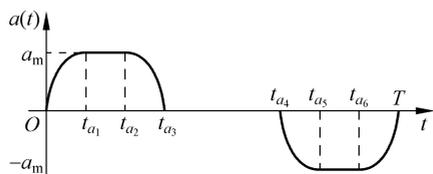
线一直线速度曲线更为理想。

3.1.5 正弦速度曲线

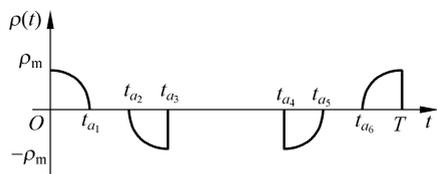
如果加速度按正弦规律变化,则所得到的运行速度曲线就是正弦速度曲线,如图 3.5 所示。电梯首先以正弦规律变化的加速度启动,在 t_{a_1} 时刻,电梯运行速度达到 v_1 ,然后以匀加速方式运行,到 t_{a_2} 时刻,电梯的运行速度达到 v_2 ,然后以变减速的方式使加速度以正弦规律逐渐减小,到 t_{a_3} 时刻,加速度减为 0,其运行速度达到 v_m ,从此刻开始,电梯匀速运行。在 t_{a_4} 时刻,电梯运行进入减速阶段,减速过程与加速过程顺序相反。



(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, ω 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。根据设定的最大加速度 a_m 、加速度变化率 ρ_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 ρ_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

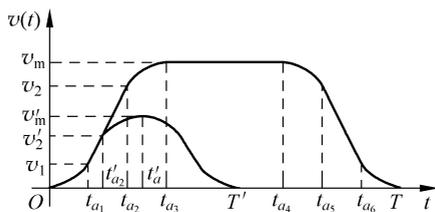


图 3.6 电梯的分速度运行曲线

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

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:

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

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

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

起动、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度运行速度。

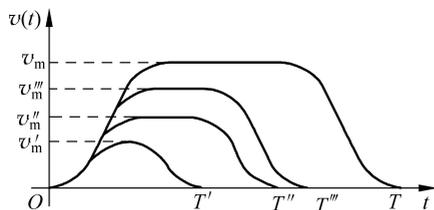


图 3.7 不同距离的速度运行曲线

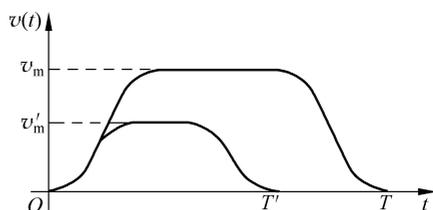


图 3.8 中高速电梯的分速度运行曲线

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晶闸管励磁的发电机—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。另一种是晶闸管直接供电的晶闸管—电动机系统,采用晶闸管把交流电直接整流、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。

ACVV 驱动方式采用晶闸管闭环调速方式,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。

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器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 为电动机感应电动势, 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, ϕ 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、励磁磁通量等因素有关的,并且与电压成正比,与励磁磁通成反比。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 ϕ 。

但是,通常很少采用改变电动机励磁磁通量的方法。

在保持电动机励磁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,在保持电动机励磁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。

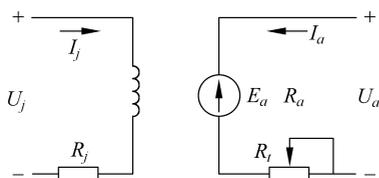


图 3.9 直流电动机电路

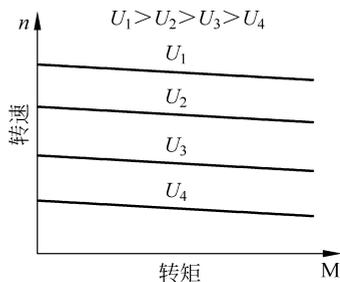


图 3.10 直流电动机机械特性

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:晶闸管励磁的发电机—电动机的拖动系统和晶闸管直接供电的晶闸管—电动机系统。

晶闸管励磁的发电机—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,所以称为晶闸管励磁系统。

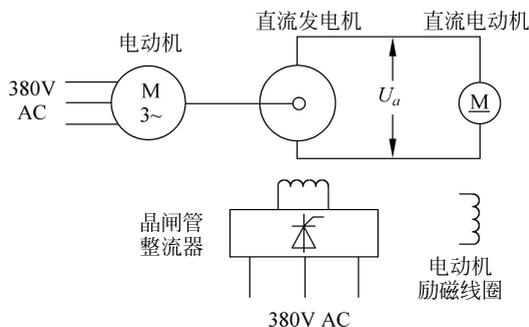


图 3.11 晶闸管励磁的发电机—电动机的拖动系统

晶闸管直接供电的晶闸管—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,它采用三相晶闸管整流器,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。

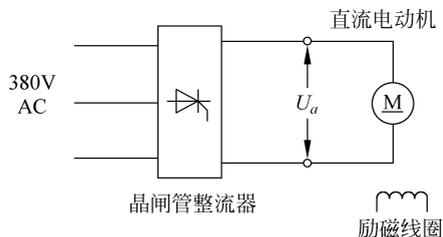


图 3.12 晶闸管直接供电的晶闸管—电动机系统

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,直流电动机再通过蜗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起动、加速到额定速度值。

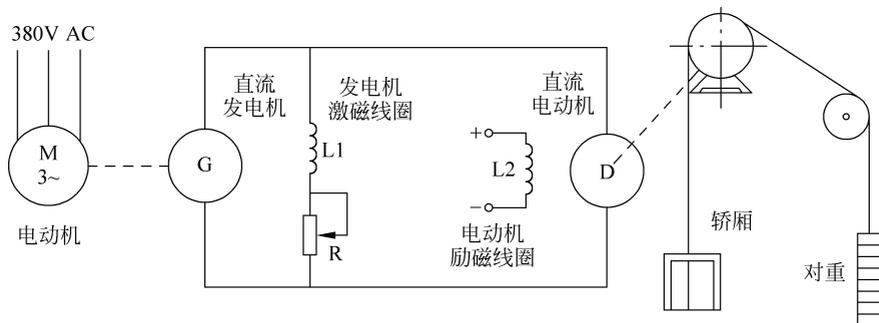


图 3.13 开环控制直流快速电梯拖动系统原理图

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时,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有效控制,使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取代。

2. 晶闸管励磁的发电机—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,用以控制晶闸管整流器的输出电压的大小和极性。晶闸管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。

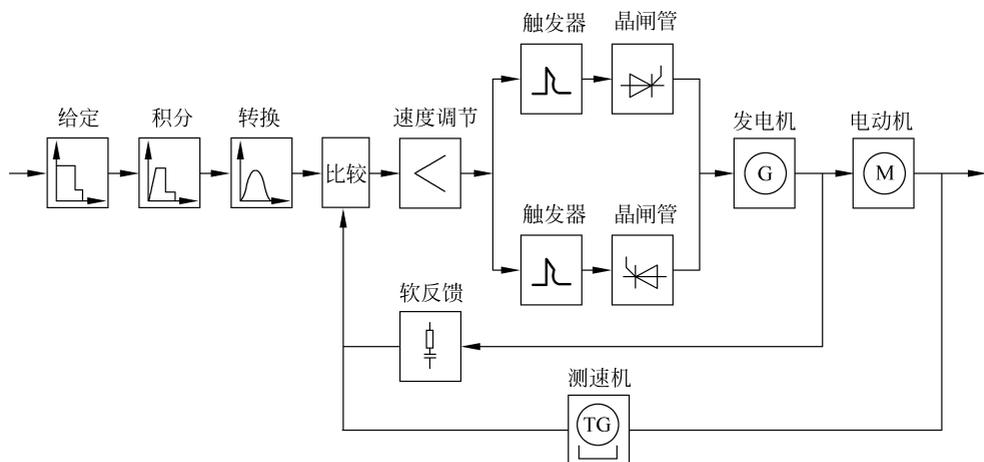


图 3.14 快速直流电梯速度调节系统原理图

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,正向组晶闸管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,反向组晶闸管整流器工作在待逆变状态。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,则电动机反转,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. 晶闸管直接供电的直流拖动系统

图 3.16 是一种由晶闸管直接供电的直流快速电梯拖动系统原理图,它主要由两组晶闸管取代了传统驱动系统中的直流发电机组。两组晶闸管可以进行相位控制,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

较运算后,就决定了两组晶闸管整流装置中哪一组应该投入运行,并根据运算结果,控制晶闸管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。

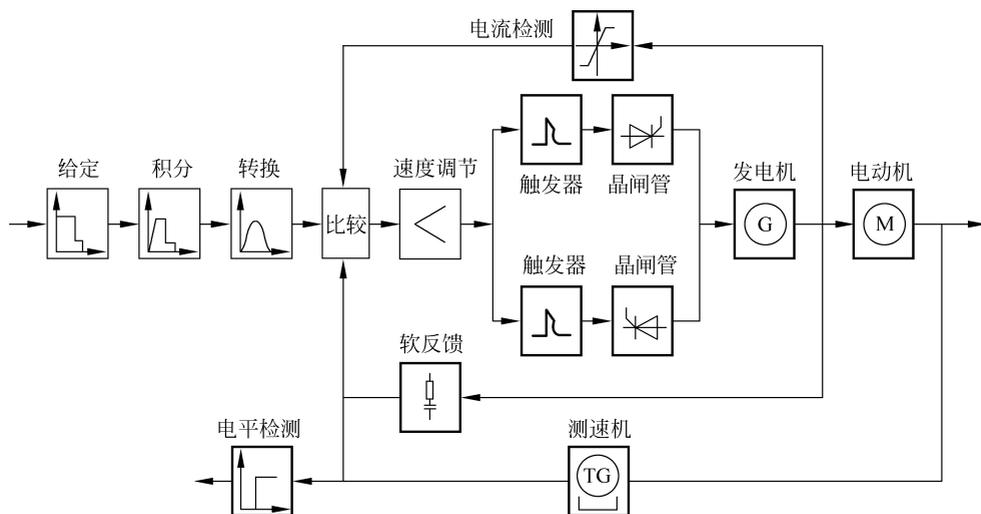


图 3.15 高速电梯速度自动调节系统原理图

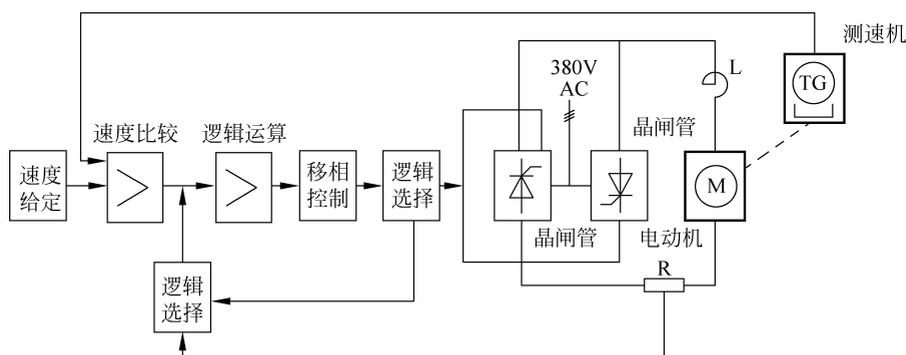


图 3.16 晶闸管供电的直流高速电梯的拖动系统的原理图

常用的晶闸管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。正反向晶闸管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,使电动机正转或反转。而电枢端电压的大小变化,则由控制晶闸管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 1.0m/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。它比双速电动机多一组 8 极绕组(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 极绕组用于正常稳速运行,18 极绕组用于制动减速和平层停车。

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,通过减小串联在快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。

慢速绕组用于低速运行,当电梯减速时,切断快速绕组电源,同时给慢速绕组供电。为了防止减速时制动电流和减速度冲击过大,通常在慢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,而慢速绕组(24 极)用作制动减速和慢速平层停车。另外,图 3.17 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,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。

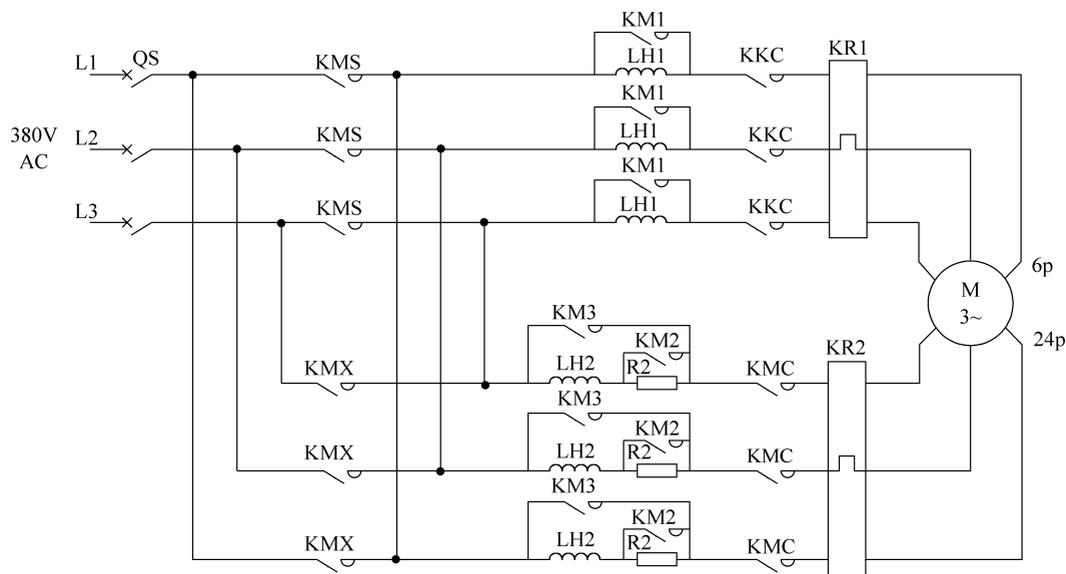


图 3.17 交流双速电梯拖动系统主电路

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一直线形速度曲线。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 3.18 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。

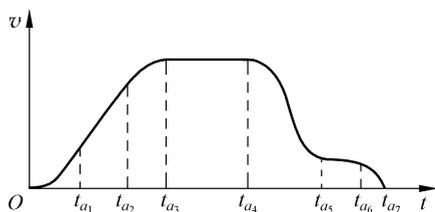


图 3.18 交流双速电梯速度曲线

慢速绕组用于低速运行,当电梯减速时,先通过快速绕组进行反向加速度比较大的减速,如图 3.18 中 $t_{a_4} \sim t_{a_5}$ 时间段;随着电动机转速降低,电动机由快速绕组切换到慢速绕组,为了限制其制动电流及减速速度,防止冲击过大,通常也在慢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 3.18 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 3.18 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)时冲过的距离较大,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 1m/s ,最大速度可达 5m/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。

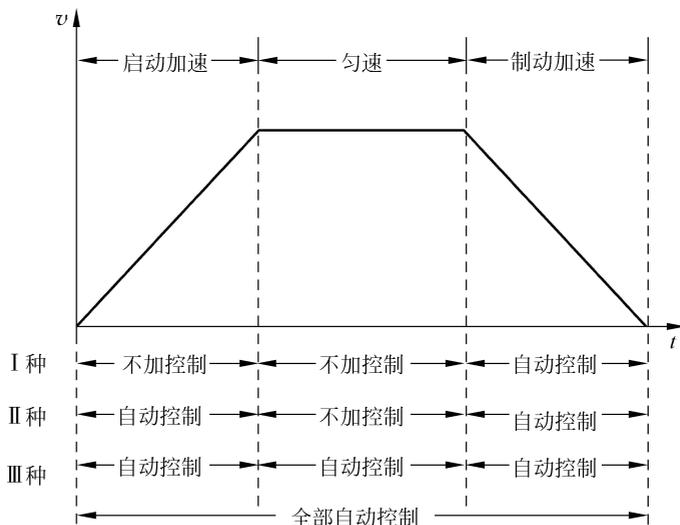


图 3.19 电梯各阶段运行控制

不管哪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,其制动原则均按距离(或模拟按距离)制动,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,使用晶闸管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、触发器控制晶闸管的触发角,这些晶闸管与电梯电动机的主绕组串接,因而就可对电动机的端电压,即电动机转矩进行控制。

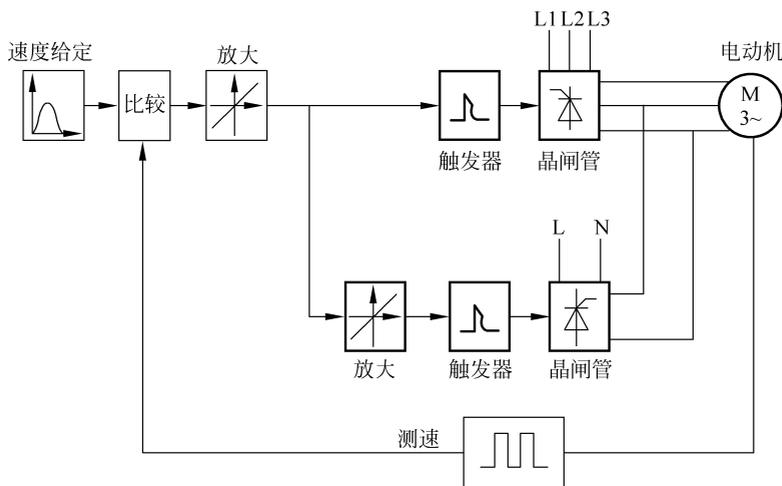


图 3.20 电梯运行全过程的调压调速系统

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晶闸管取代启动、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,是交流调压调速的另一种形式。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

这种系统采用晶闸管调压调速,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 的双速电梯上,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,利用晶闸管控制电流的大小,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,经晶闸管半控桥式整流线路,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。有轿内指令或厅外呼梯时,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,移相器触发晶闸管,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。

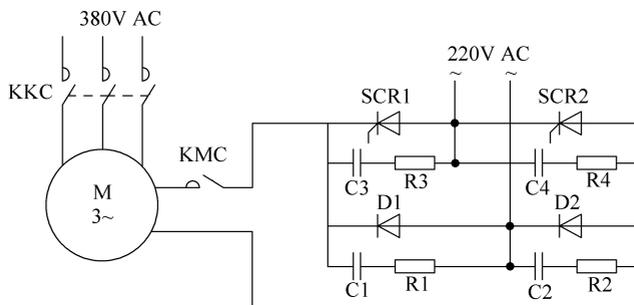


图 3.21 能耗制动原理电路

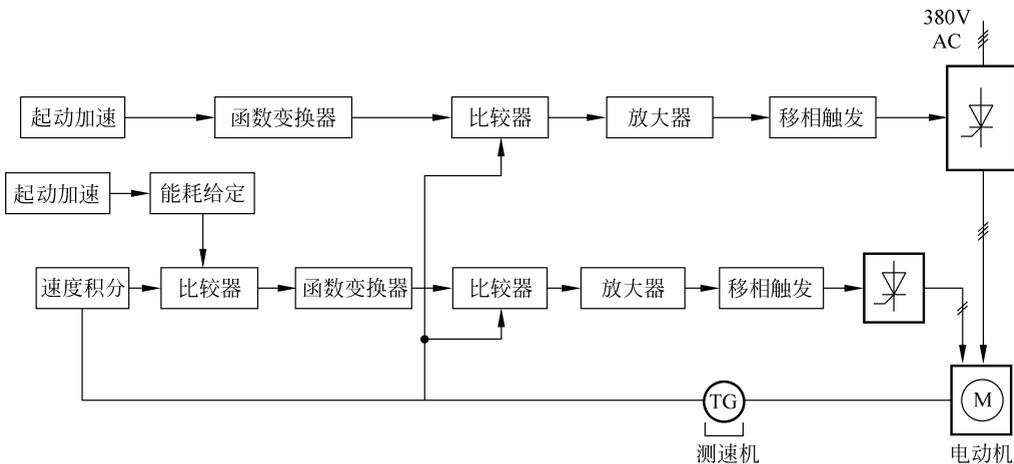


图 3.22 能耗制动交流调速系统原理

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。

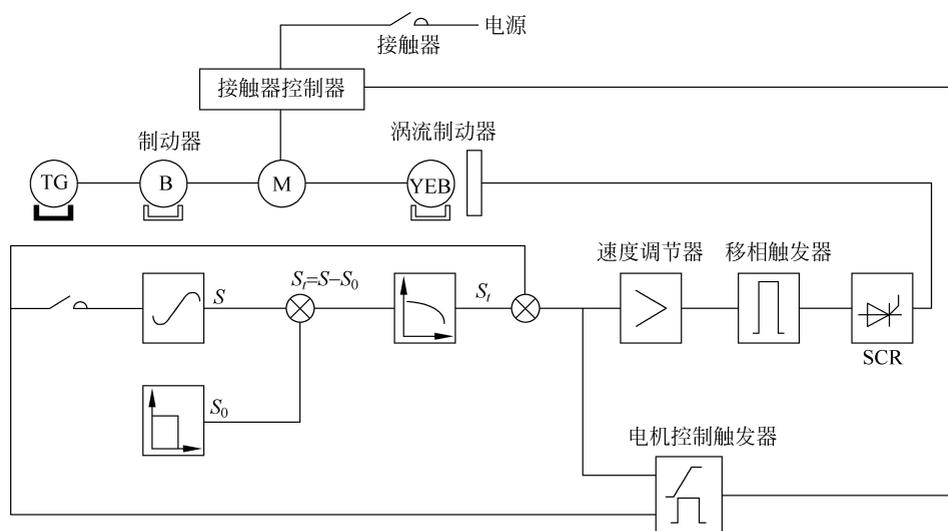


图 3.23 利用涡流制动控制的交流调速拖动系统原理

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,被控量只是一个电流。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理想,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,电动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,此时电动机以反相序运转于第Ⅱ象限。当转速下降到零时,需立即切断电动机电源,抱闸制动,否则电动机会自动反转。

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。起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,将慢速绕组接成与快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,快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。

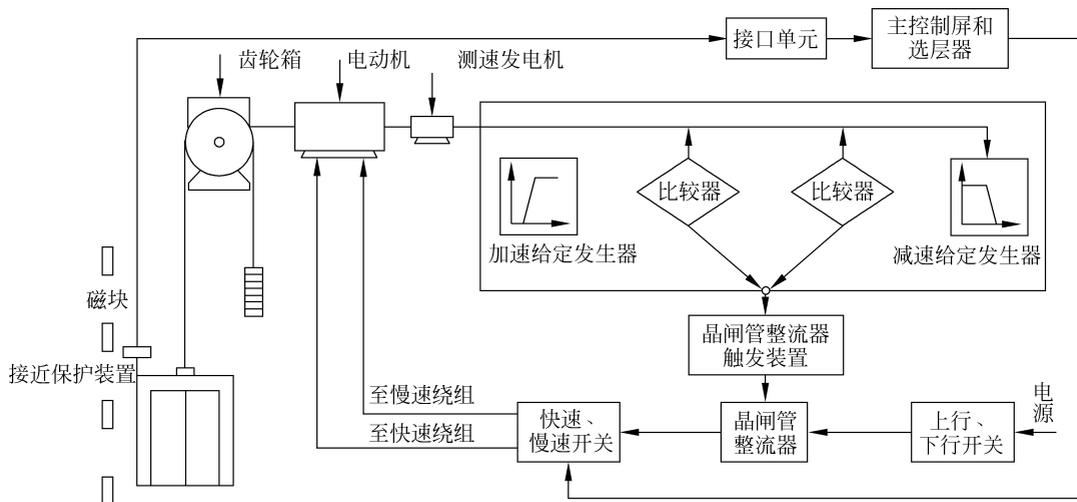


图 3.24 反接制动的交流调速电梯的拖动系统原理

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。另外在制动减速时,快速绕组不断开,而仅在慢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,但其运行性能良好,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

由于交流变频变压调速的技术日趋成熟和完善、故障率低、价格便宜,目前,交流变频变压调速已在电梯上普遍应用,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。

根据交流电动机的转速公式(3.58)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,这时就要求定子供电电压做相应调整,因此,电动机的变频器一般都要兼有调压和调频两种功能。变频变压调速(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。

根据电梯曳引电动机的恒转矩负载要求,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,即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(PWM)功能的逆变器来调频、调压。

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。

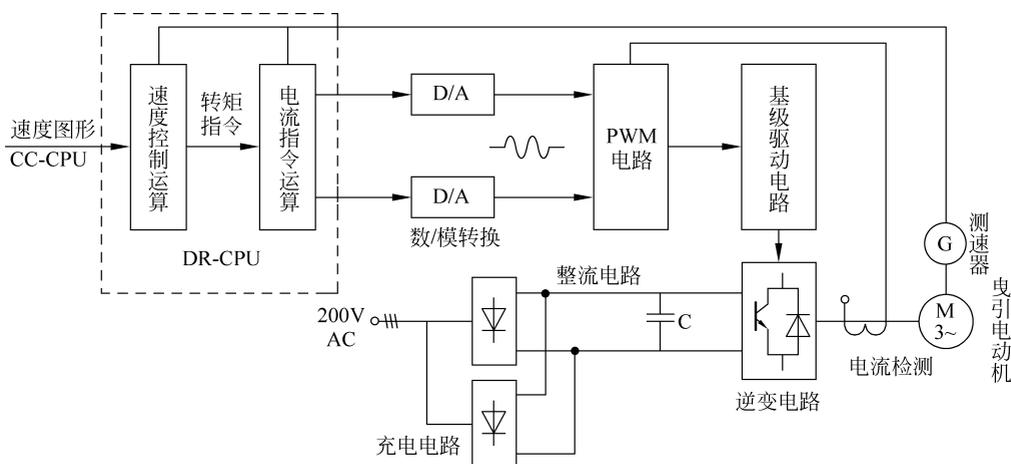


图 3.25 中、低速 VVVF 电梯拖动系统结构框图

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。三相交流电压被大功率晶体管 GTR 整流器及输入侧的交流电抗器变换成直流电压,大功率晶体管 GTR 逆变器再将它变换成可变电电压、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。

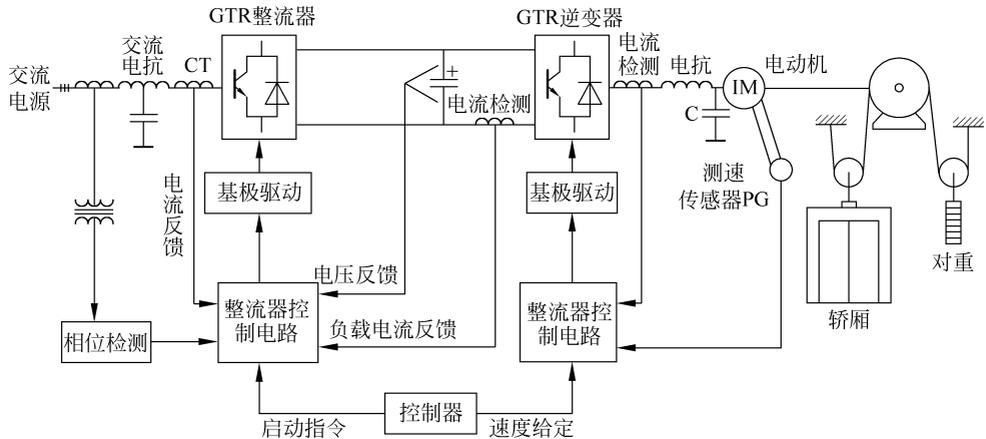


图 3.26 高速电梯用的 VVVF 控制装置原理

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,也就是说,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。

实际使用的逆变器能控制满量程,电机的转矩脉动量包括了 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。

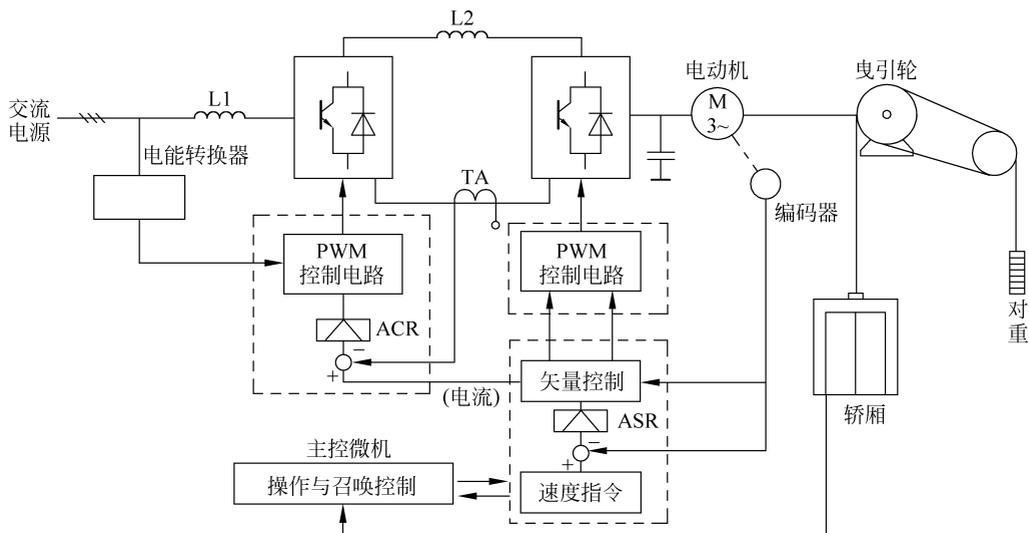


图 3.27 有逆变器及矢量系统的高速 VVVF 电梯拖动系统原理

3.7 永磁同步电梯的拖动系统

20 世纪 70 年代,永磁同步电机开始用于交流变频调速系统,到 80 年代,稀土永磁材料的研究取得了突破性进展,随着新型永磁材料在电动机上的应用,永磁同步电动机的性能有了质的飞越,成为交流调速领域中的一个重要分支。电梯的永磁同步曳引系统出现在 20 世纪 90 年代中期,1996 年,通力公司推出了采用 EcoDisc 永磁盘式无齿曳引机的小机房电梯。随后,奥的斯电梯公司也推出了采用永磁同步无齿轮曳引机及伺服变频控制技术的 GeN2 电梯系统,三菱公司也在高速电梯的曳引机上使用永磁同步电动机。与传统的交流异步电动机曳引系统相比,永磁同步电动机曳引系统具有以下优点:

(1) 传统的交流异步电动机曳引系统采用有齿传动形式,需要采用蜗轮蜗杆或行星齿轮等减速机构,结构复杂、运行噪声较大、维护难度大。永磁同步电动机曳引系统采用无齿传动形式,无需减速装置,运行噪声低,结构简单,维护简便。另外,永磁同步曳引机无须润滑油,又避免了传统曳引机齿轮油可能渗透而造成的环境污染。

(2) 传统曳引系统的传动效率低,如蜗轮蜗杆的传动效率仅为 70% 左右,增大了电梯系统的能耗。由于永磁同步电动机不需要励磁,这减少了定子电流和定子转子电阻的能耗,效率可达 94%~96%。测试表明,与异步电动机相比,永磁同步电动机可节能 30% 以上。

(3) 传统的曳引系统由于有减速装置,体积大,需要单独设置机房。在永磁同步电动机曳引系统中,电动机不需要励磁,没有线圈或鼠笼,无需减速装置,结构简单,体积小,需要的机房面积小,甚至无须机房。

(4) 采用永磁同步电动机的曳引电梯,如果制动器失效,电梯轿厢和对重装置处于自由状态时,利用永磁同步电动机的结构特点,短接三相定子绕组,电机反电动势在定子绕组中产生的电流构成阻碍电机转动的制动转矩,可有效抑制轿厢或对重的溜车速度,防止坠落事故的发生,无须额外的机械装置。

(5) 与异步电动机相比,永磁同步电动机的调速范围宽(永磁同步电动机的调速范围可达 1 : 1000 以上,异步电动机的调速范围为 1 : 100),调速精度高。

(6) 永磁同步电动机能在额定转速内保持恒定转矩,有利于提高电梯运行稳定性,尤其是在电动机低频、低压、低速时,可输出足够的转矩,可有效避免电梯缓速启动过程的抖动、改善乘客在电梯制动过程中的体验。

因此,永磁同步电机驱动无齿轮曳引机是近年来电梯工业领域中发展最快的新技术之一。

3.7.1 用于电梯的永磁同步电动机结构

永磁同步电动机由绕线式同步电动机发展而来,它的基本结构与绕线式同步电动机相似。它的定子由三相绕组和铁芯构成,绕组通常以 Y 形方式连接;而在转子结构上,用永磁体代替了励磁,无须励磁线圈、滑环和电刷。为了检测转子的磁极位置及实现电子换向,永磁同步电动机通常装有转子永磁体位置检测传感器。另外,永磁同步电动机的定子也采用叠片结构,以减小电动机运行时的铁耗,而转子磁极的结构与永磁材料性能和应用领域有关,因此具有多种不同的形式。由于稀土永磁材料的磁能面积大,矫顽力和剩磁密度高,目前永磁同步电动机多采用稀土永磁材料,下面简单介绍用稀土永磁材料做磁体的永磁同步电动机的结构。

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。永磁体常做成瓦片式或薄片式,贴在转子的表面或嵌在转子铁芯中;图 3.28(a)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(b)为外转子式永磁同步电动机磁极结构,永磁体贴在转子的内表面。

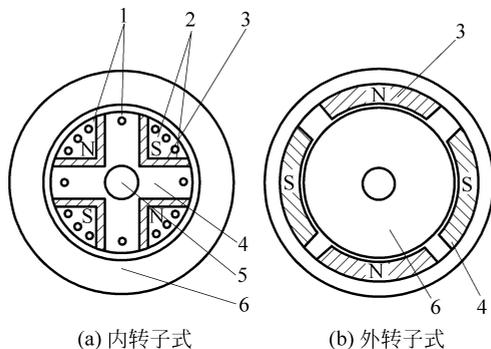


图 3.28 永磁体同步电动机转子结构

1—启动笼; 2—极靴; 3—永磁体; 4—转子轭; 5—转轴; 6—定子

内置式转子结构的永磁体安装在转子铁芯内部,如图 3.29 所示,永磁体表面与定子铁芯内圆之间(对外转子磁路结构则为永磁体内表面与转子铁芯外圆之间)有由铁磁材料制成的极靴,极靴中可以放置转子导条,起阻尼和制动作用,这种结构在异步启动永磁同步电动机中应用较多。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护,具有较高的机械强度。其转子磁路的不对称性所产生的磁阻转矩有助于提高电机的过载能力和功率密度。

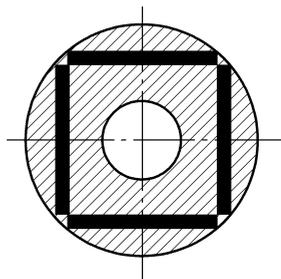


图 3.29 内置式转子结构

表面式转子结构又分为凸出式和插入式,如图 3.30(a)、(b)所示。

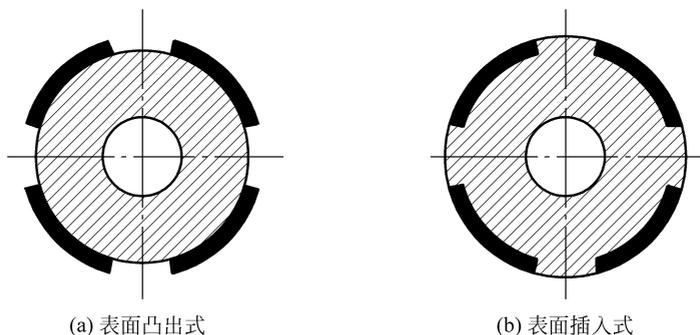


图 3.30 表面式转子结构

表面凸出式转子的纵轴电感与横轴电感相等,且与转子位置无关,该结构的永磁磁极容易实现优化设计,使电动机气隙磁密波形趋近于正弦波。

表面插入式转子的转子磁路结构不对称使电动机产生磁阻转矩,其大小与电动机纵轴电感与横轴电感的差值成正比。这种结构的电动机功率密度较高,动态性能较好,制造工艺相对简单,但是漏磁系数较大,成本较高。

在转子表面安装永久磁体可以获得足够的磁通密度和高矫顽力特性,且转矩/重量比较高。但是,由于转子表面无法安放启动绕组,因此没有异步启动能力。大功率变频器调速的永磁同步电机大多采用稀土永磁材料的表面转子磁路结构。

在相同外形条件下,外转子结构较内转子结构有更大的力臂,有利于提高低速电动机的力矩,且外转子结构更利于磁钢的布置。表面凸出式外转子磁路结构是磁场定向控制永磁同步电动机理想的结构,而插入式结构则优先用于需要进行弱磁控制和扩大动态转矩的场合。这两种转子结构的永磁同步电动机都可用于无齿曳引电梯。

电动机工作时,由变频器输出的频率、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。这个旋转磁场与永磁体磁极作用,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。当定子绕组接入由变频器输出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的电流相位,确保转子磁场方向与定子绕组电流矢量正交。永久磁体产生的恒定磁场总与定子电流正交,因此,电磁转矩和定子电流具有线性关系。由于转子上没有电流,电动机的发热状况只取决于定子绕组电流的大小。

3.7.2 永磁同步电梯的拖动系统原理

图 3.31 为一个采用永磁同步电动机的曳引电梯拖动系统。主控制器负责与从控制器、轿厢、门系统、层站等之间通信,控制电梯实现其使用功能。从控制器负责拖动系统调速控制,使电梯按照预定的速度曲线运行。主回路采用交—直—交结构为交流永磁同步电动机提供电源。

主回路由整流、滤波和逆变电路构成。三相交流电源流经整流器整流为直流,经 R 、 C_1 、 C_2 组成的滤波电路滤波,消除其中的脉动成分。 C_1 和 C_2 为 2 个具有相同电容量和耐压值的电容,其作用是在获得滤波器需要的电容量的同时,使滤波器具有较高的耐压值。为

为了保证两个串联电容器 C_1 、 C_2 上的压降相同,在 C_1 、 C_2 上分别并联了 2 个均压电阻 R_1 、 R_2 。

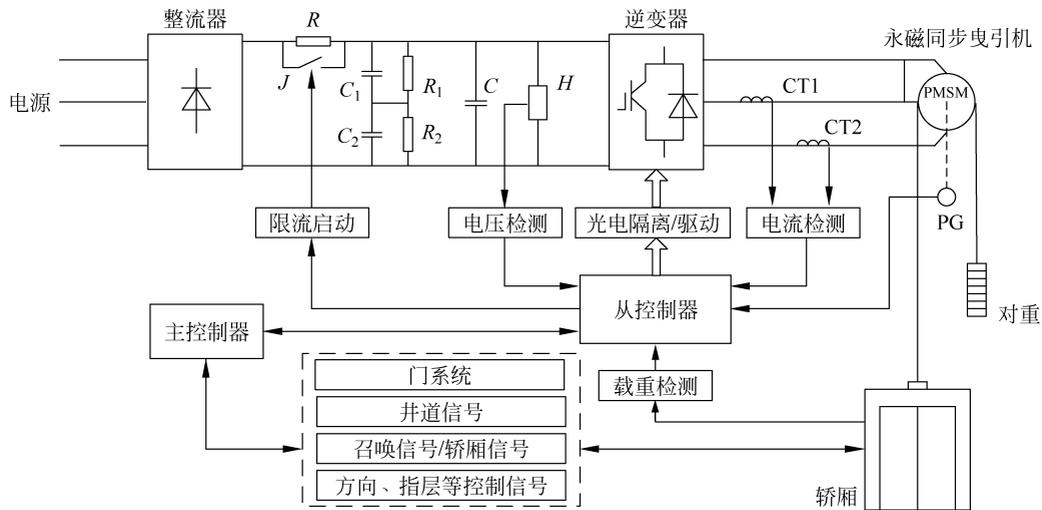


图 3.31 采用永磁同步电动机为曳引电梯拖动系统的原理图

电阻 R 也起限流电阻的作用,它和继电器 J 结合,实现交流永磁同步电动机的限流启动功能。在主回路接入电源的瞬间,如果没有限流电阻,回路的电阻几乎是零,那么,滤波电容的充电电流将很大,过大的冲击电流可能损坏三相整流桥,同时也会使电源电压下降。为减小冲击电流,在主回路接通电源后的一段时间内,继电器 J 常开触点断开,电路串入限流电阻 R ,从而将电容的充电电流限定在允许的范围内。当电容器充电到一定程度后,常开触点 J 闭合,将电阻 R 短接,为逆变器正常工作提供足够的驱动电流。

逆变器采用 IGBT 模块,由从控制器输出的 PWM 波经过光电隔离/驱动电路控制逆变器产生可变频率和幅值的三相交流电源,输入永磁同步电动机定子,驱动电动机工作,带动电梯运动。由于逆变器工作时开关频率较高,开关动作时会在主回路的直流环节产生电流突变。由于主回路存在分布电感,在 IGBT 的集电极、发射极,以及直流母线上会产生高频的尖峰电压毛刺,它不但影响逆变器的工作,有时还会损坏 IGBT 模块。因此,通常需要在电路中设置缓冲电路,在图 3.31 中,电容 C 起到此作用。

图 3.31 中电路 H 用于检测直流母线的电压, PG 为旋转编码器,用于检测永磁同步电动机的转速以及提供轿厢的位置信息,电流互感器 $CT1$ 和 $CT2$ 用于测量逆变的电源电流。另外,通过称重传感器检测轿厢的载重量,用来进行曳引机的力矩补偿,改善电梯的运行平稳性。

主控制器收集轿厢中的选层信号、开关门指令信号、厅外召唤信号、电梯井道的检测开关和限位开关信息,同时,通过与从控制器通信获取轿厢的位置信息及拖动系统相关的状态信息,通过执行预先设置的运行模式程序实现指令登记与销号、选层定向、楼层与方向指示、开关门控制、故障检测与报警等。

从控制器实现拖动系统调速控制,通过采集直流母线电压、逆变器输出电流、轿厢负荷、电动机转速等信息,通过调速控制算法计算逆变器的开关状态,通过光电隔离/驱动电路输出 PWM 波,控制逆变器输出频率和幅值可变的三相交流电源,实现永磁同步电动机的转速控制。

目前,用于电梯的永磁同步电动机控制方式主要有2种——矢量控制和直接转矩控制。矢量控制利用坐标变换,把实际的三相电流变换成等效的力矩电流分量和励磁电流分量,由上述解耦的电流分量来实现对于同步电动机输出转矩的控制。而直接转矩控制是在保持定子磁链幅值不变的情况下,通过空间电压矢量来控制定子磁链和转子磁链之间的夹角,实现电动机输出转矩的控制。

1. 永磁同步电动机的矢量控制原理

取永磁同步电动机的永磁体的磁极轴线为 d 轴,逆时针方向旋转 90° 电角度为 q 轴,建立两相旋转 dq 坐标系。永磁同步电动机在 dq 轴坐标系中的数学模型为:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3.60)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (3.61)$$

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega_r \psi_q \quad (3.62)$$

$$u_q = R_s i_q + p\psi_q - \omega_r \psi_d \quad (3.63)$$

$$T = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.64)$$

式中, n_p 为极对数; p 为微分算子; T 为转矩; R_s 为永磁同步电动机定子电阻; ψ_f 为永磁电动机的转子永磁; ω_r 为电动机转速。

在隐极式永磁同步电动机中,电感的 d 、 q 轴分量相等,将式(3.60)和式(3.61)代入式(3.62),并化简可得:

$$T = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (3.65)$$

保持 $i_d = 0$,可以使得转矩与 i_q 成正比,并可以保证用最小的电流幅值得到最大的输出转矩值。

图 3.32 为永磁同步电动机的矢量控制原理图。电动机转速给定信号 ω_r^* 与检测到的转子转速信号 ω_r 相比较,转速偏差通过 PI 控制器输出控制转矩的电流分量 i_q^* ,把它作为电流给定量与坐标变换得到的电动机实际电流分量 i_q 相比较,其偏差再通过 PI 控制器运算生成反 Park 变换的输入,通过反 Park 变换把转子电流分量转换为定子电流分量,由反 Park 变换生成 PWM 波用来控制 IGBT 输出可变频率和幅值的三相正弦电流,输入电动机定子,驱动电动机工作。

在矢量控制算法实现时,需要把检测到的电动机三相定子电流转换到转子坐标系上,通常使用两种变换——Park 变换和 Clarke 变换。

(1) Clarke 变换:把定子电流转换到 $\alpha\beta$ 坐标系,即把 3 坐标系转换为 2 坐标系。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

(2) Park 变换:把 $\alpha\beta$ 坐标系中的电流分量转换到转子坐标系

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

式中, θ 为转子位置与 A 相定子绕组夹角。

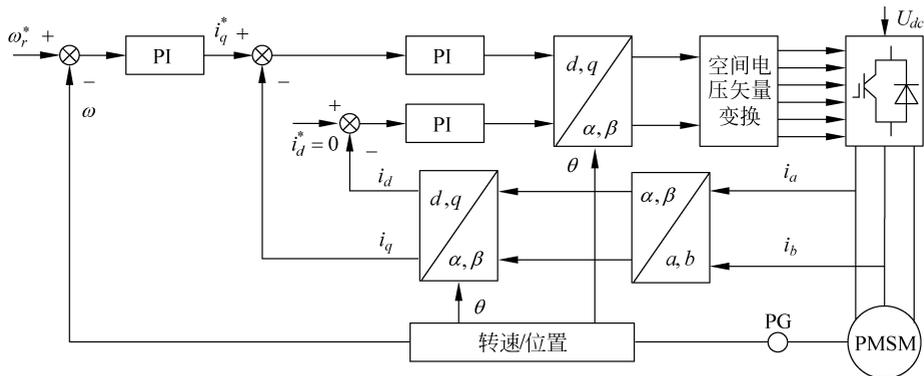


图 3.32 永磁同步电动机的矢量控制原理

2. 永磁同步电动机直接转矩控制原理

与矢量控制不同,直接转矩控制摒弃了解耦的思想,取消了旋转坐标变换,通过检测电动机定子电压和电流,借助瞬态空间矢量理论计算电动机的磁链和转矩,并根据与给定值比较所得的差值,实现磁链和转矩的直接控制。在永磁同步电动机直接转矩控制时,定子磁链与输入电压关系为:

$$\psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (3.68)$$

式中, u_s 为定子电压; i_s 为定子电流; ψ_s 为定子磁链。

式(3.68)表明,可以通过控制电动机的输入电压 u_s 来使定子磁链按照一定的轨迹和速度运动,从而达到控制磁链的目的。永磁同步电动机的转矩计算式为:

$$T = \frac{3n_p}{4L_d L_q} |\psi_s| [2\psi_f L_q \sin\delta - |\psi_s| (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (3.69)$$

式中, δ 为定转子磁链之间的夹角。

对于隐极式同步电动机,电感的 d 、 q 轴分量相等,因此式(3.69)可以化简为:

$$T = \frac{3n_p}{4L_d} |\psi_s| \psi_f \sin\delta \quad (3.70)$$

式(3.70)说明,当定子磁链幅值保持不变时,可以通过控制负载角来控制电动机的电磁转矩。在恒定负载、稳定运行时,定、转子磁链都以同步速旋转,此时 δ 为恒定值;瞬态时, δ 则因定、转子旋转速度的不同而不断改变。通常情况下,电动机的电气时间常数远远小于机械时间常数,与转子磁链旋转速度相比,定子磁链的旋转速度更易改变。因此通过对逆变器开关状态的适当选择,保持定子磁链幅值近似恒定,控制定子磁链空间矢量旋转速度,即快速改变定、转子间的磁链夹角,就能控制永磁同步电动机的输出转矩。

图 3.33 为永磁同步电动机直接转矩控制的原理框图。转速误差经过 PI 控制器计算输出作为转矩给定值 T^* ,与计算的反馈转矩 T 进行比较,同时将计算的定子磁链 ψ_s 与给定磁链 ψ_s^* 作比较,综合磁链和转矩滞环比较器的输出,同时结合磁链的空间位置,经过电压矢量选择表选择相应的电压矢量来控制电动机的运行。

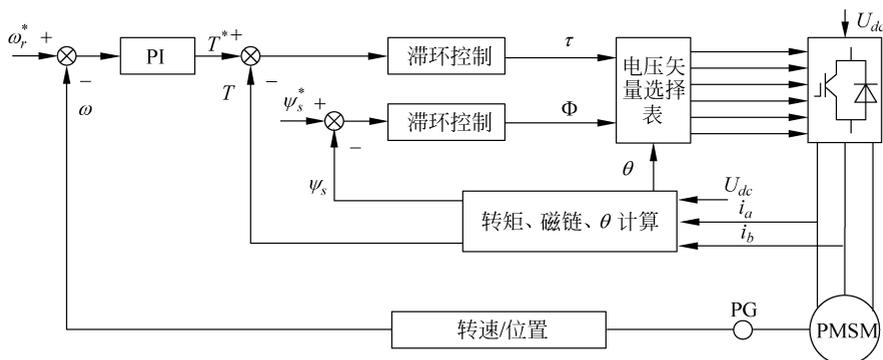


图 3.33 永磁同步电动机直接转矩控制原理

3.7.3 永磁同步电梯的封星制动

从 3.7.1 节可知,永磁同步电动机的定子结构与异步电动机相同,由三相绕组和铁芯构成,绕组通常以 Y 形方式连接,见图 3.34(a);而转子在结构上不同于异步电动机,它用永磁体代替了电励磁。因此,即使在永磁同步电动机定子绕组未通电时,电机内部的磁场依然存在,转子转动时形成旋转磁场,定子绕组产生感应电流,永磁同步电动机工作在发电状态。如果此时将定子的三相绕组短接形成回路,见图 3.4(b),绕组中的感应电流在旋转磁场中切割磁力线,因此而产生电磁力矩,阻止转子转动。因此,永磁同步电动机这种特性可以用于对其实现制动。把 Y 形方式连接的三相定子绕组短接称为封星,这种制动方式在永磁同步电梯中被称为封星制动,这是永磁同步电动机特有的一种制动方式。

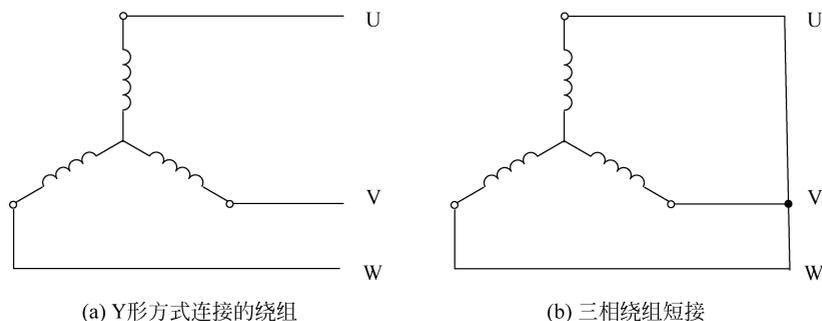


图 3.34 永磁同步电动机定子三相绕组连接形式

图 3.35 为一种电梯中典型的三相永磁同步电动机封星电路。图 3.35 中 KDY 为电源接触器, KFX 为封星接触器。在永磁同步电动机失电时,接触器 KDY 常开触点断开,封星接触器 KFX 常闭触点闭合,使电动机的 U/V/W 端被短接,相互短接,定子绕组被连接成一个独立的电气回路。当曳引机在轿厢、对重不平衡力矩的作用下旋转时,永磁同步电动机内的静止三相绕组线切割旋转的永磁体产生磁场而感应出电动势,由于三相绕组线被短接,在定子绕组回路的感应电流在永磁体磁场作用下产生电磁力矩,这个力矩的反力矩作用于转子的永磁体上形成了制动转矩,阻碍曳引机旋转。

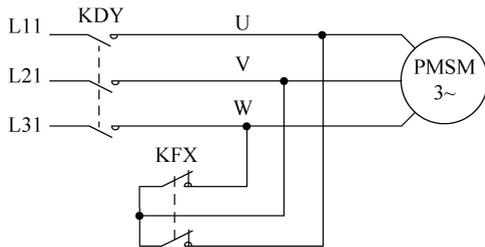


图 3.35 封星电路

图 3.36 为一台永磁同步电动机三相绕组短接时转速与转矩的关系曲线。制动力矩在 A 点达到最大值,当转速高于 A 点的转速时,随着转速的增大,制动力矩将会随之减小,进入非稳定区。由此可见,永磁同步曳引机在低速时三相绕组短接(封星),可以得到稳定的、足够大的制动力矩,当电动机转速较高时,三相绕组短接并不能获得稳定和足够的制动力矩。图 3.37 是一台永磁同步电动机三相绕组短接后的转速和绕组电流之间的关系。三相绕组短接后,转速越高,绕组中的感应电流越大,当转速超过一定值后,感应电流将趋于一个恒定值。

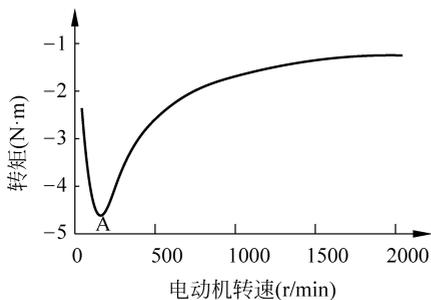


图 3.36 转速与转矩的关系曲线

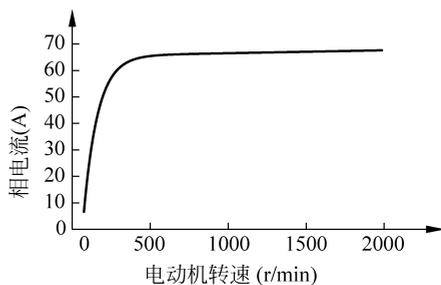


图 3.37 转速和绕组电流之间的关系

图 3.38 为具有封星制动功能的永磁同步电梯的拖动及控制系统。该系统采用一体化控制器,这种控制器把电梯控制和电机驱动集成在一起。图 3.38 中,接触器 KMC、KMY 为电动机电源接触器,接触器 KMB、KMZ 为抱闸控制接触器,KAS 为门联锁继电器,KAY 为封星接触器,SBK2 为抱闸动作检测开关,WK 为电动机温度检测开关,RC1~RC4 为电阻电容串联组成的浪涌抑制器。

电梯系统上电时,安全回路导通,则控制系统供电,如果电梯响应服务,电梯轿门和所有层站的厅门关好之后(KAS 常开触点闭合),即可启动运行,此时,抱闸控制接触器 KMB、KMZ 线圈得电,其常开触点闭合,抱闸控制接触器 KMB、KMZ 线圈得电,制动器线圈得电而松闸;与此同时,接触器 KMB 的常开触点使得封星控制电路的电源接通,接触器 KAY 线圈得电,其常闭触点断开,断开电动机定子三相绕组的短路连接,KAY 的常开触点闭合,使得 KMC、KMY 线圈接通控制电源而得电,它们的常开触点把电动机与一体化控制器的主回路输出端接通,电动机三相绕组供电,电梯启动。

电梯停靠或意外情况中断运行时,KMC、KMY 线圈失电,KMC、KMY 主触点断开,曳引机停止工作,抱闸控制接触器 KMB、KMZ 线圈失电,制动器线圈失电而抱闸制动,另外,受 KMB 控制的 KAY 线圈失电,KAY 常闭触点在 R1 和 C1 的作用下延时闭合,电动机定

子的三相绕组在主回路断电后一段时间后被短接,电动机实施封星制动。KAY 常闭触点延时闭合这样避免永磁同步电动机高速运行时短接三相绕组而导致大电流短路的情况发生,另外,KAY 常开触点断开,使得 KMC、KMY 线圈无法得电,保证了在封星制动时主回路不会给电动机供电,电动机的封星制动是电动机断电的情况下进行。

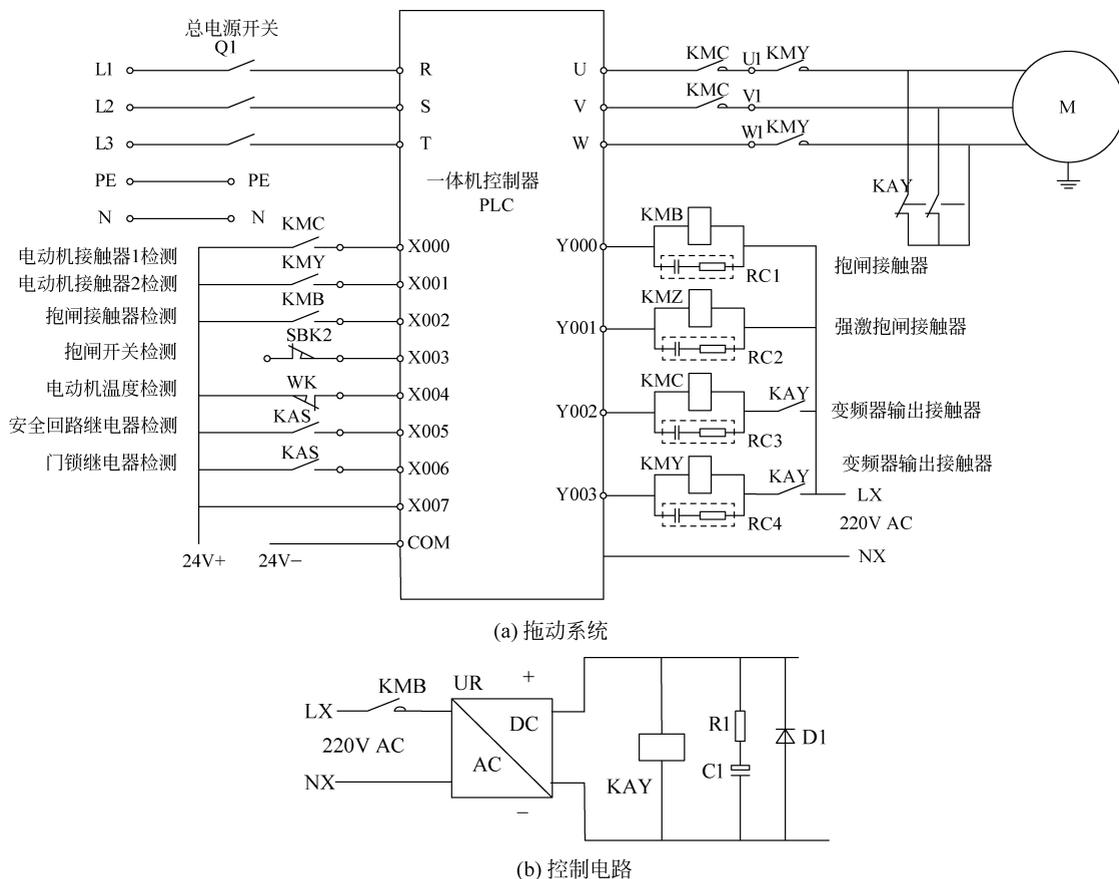


图 3.38 永磁同步电动机封星及控制电路

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) 简述抛物线一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) 当抛物线一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? 以抛物线一直线速度曲线为例,简述分速度运行

的原理。

- (9) 简述电梯拖动系统的分类。
- (10) 直流电梯调速通常采用哪几种方法?
- (11) 试比较由电动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?
- (12) 简述直流电动机电梯拖动系统的工作原理。
- (13) 简述晶闸管励磁的电动机拖动系统的工作原理。
- (14) 简述晶闸管直接供电的直流拖动系统的工作原理。
- (15) 对于交流拖动系统来说,实现电动机转速调节有几种途径?
- (16) 以图 3.17 为例分析,说明交流双速电梯的工作原理。如果电梯供电电源的相序发生改变,电路工作状态将如何变化?
- (17) 简述电梯运行全过程的调压调速系统的工作原理。
- (18) 简述能耗制动交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (19) 简述涡流制动交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (20) 简述反接制动交流调速电梯拖动系统的工作原理。
- (21) 简述图 3.25 的 VVVF 电梯拖动系统的工作原理。
- (22) 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?
- (23) 以图 3.31 为例,分析说明永磁同步曳引电梯拖动系统的工作原理。
- (24) 为什么永磁同步电梯要有封星制动电路? 如何实现永磁同步电动机的封星制动?