

用传递函数仿真 SS 3 型 电力机车的牵引起动过程

顾 松 彬

(上海铁路局永安机务段)

摘 要 通过分析 SS3 型电力机车的控制系统与牵引过程,建立系统的传递函数形式的数学模型,用 CSS 仿真程序进行计算牵引过程,并将模拟某次列车起步运行的运算结果与该次实际起步运行情况进行对比¹⁹。这种计算方法也可用于其他内燃、电力机车的牵引计算,还可用于探索列车提速运行方案的可行性,以及校核和提高运行方案的合理性¹⁹。

关键词 传递函数;仿真;电力机车;牵引

分类号 TM 922.71

0 引 言

铁道部进行列车大提速的工作(或在平时对列车运行图进行比较大的改编)需要制定新的列车运行图,用手工方法,所需的人力和时间是相当大的,并且非常复杂¹⁹。如果在计算机上编制新运行方案并反复进行模拟运行,来探索列车运行新方案的可行性,提高新方案的合理性,将是很方便的¹⁹。

对机务部门而言,编制新的列车操纵运行图,分析牵引的合理性,或分析列车坡停、冒进、冒出等各种故障情况,同样可以在计算机上运行有关程序如 CSS 仿真程序,输入相关数据,对实际情况进行模拟运行,探索发生的可能性¹⁹。

电力机车运行时,各参数之间存在着密切关系,如电压、电流、速度、牵引力等¹⁹。同时,外部条件的影响,机车性能发挥的优劣,以及运行的方案的合理与否,都直接影响铁路运输的效率和效益¹⁹。对于不断变化的各种条件,相应地修改或重新编制运行方案,或分析故障情况,以便提高安全效益,在实际工作中是势在必然和不可缺少的¹⁹。本文将通过变换的传递函数形式的数学模型,进行模拟电力机车牵引列车的起动过程的计算¹⁹。

1 数学模型和各环节传递函数的计算转换

1.1 控制系统

SS3型电力机车的控制系统如图1所示(见文献[1]、[2])(13)

其中 U_r —— 司机手柄指令,
为 $0 \sim 13 \text{ V}$ (SS3型电力机车为
恒流起动,限压运行方式);
 V —— 运行速度,为 0
 $\sim 100 \text{ km/h}$ (13)

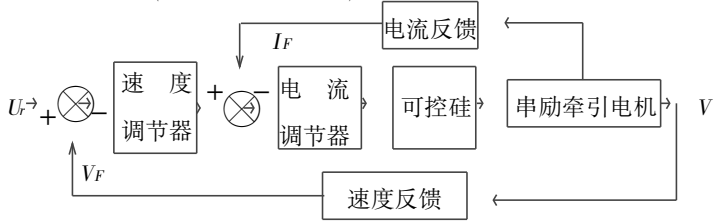


图1 SS3型电力机车的控制系统框图

由于客车的重量达 1000 t
左右,货车重量可达 3000 t 左

右或更多,都具有相当巨大的机械惯性,所以,通过调节牵引电机端电压 U_d 来调整牵引电机电流,远远快于列车的加速过程(13)

从SS3型电力机车的特点出发,作二个假设:

(1) 转向架平衡作用良好,每个动轮载荷相等,忽略牵引电机的特性差异及动轮直径的差异(13)这样一台串励牵引电机的机电模型可表示为一台机车,其牵引重量和所受阻力为整台机车的六分之一;

(2) 串励电动机的主磁通与电枢电流 i_d 的非线性关系为 $\Phi = f(\beta_d)$, 其中 $\beta = 0.95, 0.75, 0.54, 0.45$ 是磁场削弱系数;满磁场时 $\beta = 0.95$ 是电机的负载磁化曲线,即认为过渡过程是无惯性的

1.2 控制系统的计算

(1) 串励牵引电动机的传递函数

SS3型电力机车是采用调压开关8级调压并结合级间无级调压的进级方式(13)可以认为牵引电机的电压变化是 $U_d + \Delta U_d$; ΔU_d 的值越小,电压曲线的平滑性越好(13)

进级时串励牵引电机的电压平衡方程式为(见文献[3])

$$U_d = L \frac{di_d}{dt} + R i_d + C_e \Phi V \quad (1)$$

其增量为 ΔU_d 的增量方程式为

$$\Delta U_d = L \frac{d\Delta i_d}{dt} + R \Delta i_d + C_e (\Phi_o \Delta V + V_o \Delta \Phi), \quad (2)$$

牵引电机的轮周牵引力方程为

$$F_k - w = C_m \Phi_d - w = \frac{1}{m} \frac{dV}{dt}, \quad (3)$$

其增量方程为

$$C_m' (\Delta \Phi_o + \Phi_o \Delta_d) = \frac{1}{m} \frac{dV}{dt} + A_1 \Delta V \quad (4)$$

式(2)、(4)联立,进行拉氏变换,可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta I(s) &= (1/R_o)(T_{do}s + 1)^{-1} [\Delta U_d(s) + K_{eo} \Delta V(s)], \\ \Delta V(s) &= (K_{Mo}/A_1)(T_{ss} + 1)^{-1} \Delta I(s) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $T_s = \bar{m}/A_1$ —— 轮周阻力时间常数; $T_{do} = L/R_o$ —— 等效机电时间常数;
 $\bar{m} = (1+r)M_1/N$ —— 平均于一台牵引电机的列车规算质量, 一般 $1+r=1.06$;
 $N=6$ —— 牵引电机台数; M_1 —— 列车质量(本文设货车 $2500 \times 10^3 \text{ kg}$);
 A_1 —— 速度阻力系数(由文献[2]可知 $A_1=0.0388$);
 $K_{eo} = C'_e \Phi_o$, $K_{Mo} = C'_M \Phi_o$,

$$R_o = R + K_{eo} K_{bo} V_o / I_o, \quad K_{Mo} = (K_{bo} + 1) K_{Mo},$$

$K_{bo} = \tan \alpha / \tan \beta_o$ (由文献[2]、[3]磁化曲线得);

R —— 牵引电机的回路总电阻, Ω ; C_e —— 折算于机车速度的反电势常数;

C_M —— 折算于轮周牵引力的转矩常数; W —— 平均于每台牵引电机的列车阻力, N;

L —— 牵引电机回路的总电感, H(13)

参数值的计算如下

(a) 主磁通 Φ

ZQ800-1 型牵引电机的磁化曲线, 通过插值法求解瞬时电流 β_d 所对应的主磁通 Φ , 设 P 个端点, 那么有下式(见文献[2])

$$\Phi = \Phi_{-1} + [(\Phi - \Phi_{-1}) / (I_j - I_{j-1})] (\beta_d - I_{j-1}) \quad (13)$$

(b) 回路电感 L

牵引系统中 L 是一个储能元件, 对牵引过渡过程的能量传递没有影响, 对电流变化的幅值没有影响, 均当作常数处理, 能满足仿真运算的要求(13)

对于工频单相全波整流电路, 回路电感 L 与电流脉动系数 K_i 的关系式为

$$L = 1.05 U_d / 1000 I_d K_i \quad (13) \text{ H}$$

SS3 型电力机车的电流脉动系数为 $K_i = 0.25 \sim 0.3$ (见文献[2]),

(c) C'_e 和 C'_M

$$C'_e = (60 \mu / \pi D_k) C_e, \quad C'_M = (2 \mu / D_k) \eta C_M.$$

其中 $C_e = 12$, $C_M = 114.6$ 是串励牵引电动机的结构常数;

η 为齿轮传动效率, 查文献[2]得 $\eta = 0.975$

D_k 为动轮直径, 取半磨耗的 $D_k = 1.2m$; μ 为 SS3 型电力机车的齿轮传动比, $\mu = 4.35$ (13)

经计算, $C'_e = 831.2$, $C'_M = 810.1$ (13)

(d) 回路电阻 $R = R_w + R_d$,

R_d 为 ZQ800-1 型牵引电动机的直流电阻;

R_w 为 SS3 型电力机车整流柜输出外特性等效电阻, 由文献[4]的参考计算, 不同级位的电阻值($N=1 \sim 8$)代入, 求得电阻值组, 进行运算(13)

(e) 规算质量 $\bar{m}$

SS3 型电力机车重量为 $138 \times 10^3 \text{ kg}$, 设牵引货车重车为 $2500 \times 10^3 \text{ kg}$, 则有

$$\bar{m} = (138 \times 10^3 + 2500 \times 10^3) (1+r) / 6 = 466.05 \times 10^3 \text{ kg} \quad (13)$$

(f) 归算阻力 W

相当于列车单位重量阻力,货车重车的运行单位阻力计算式(见文献[2])

$$W = 9.8 \times [w_i + 1.07 + 0.0011 \times 3.6v + 0.000236(3.6v)^2] = 9.8w_i + 10.486 + 0.0388v + 0.03v^2 = 9.8w_i + A_0 + A_1v + A_2v^2.$$

即 $A_0 = 10.486$, $A_1 = 0.0388$, $A_2 = 0.03$ (13)

当 $v = 0$, 加入附加起动阻力 $W_q = 9.8 \times 5 \text{ N/t}$

当加速到 $v > 2.78 \text{ m/s}$, $W_q = 0$ (13)

在 $0 < v \leq 2.78 \text{ m/s}$ 时, 忽略 v^2 项, 有单位阻力计算公式为

$$w = 9.8w_i + 9.8 \times 5 + 10.486 + 0.0388v \cdot \text{N/t}$$

在 $v > 2.78 \text{ m/s}$ 时, 有单位阻力计算公式为

$$w = 9.8w_i + 10.486 + 0.0388v + 0.03v^2 \cdot \text{N/t}$$

w_i 是线路附加阻力, 包括坡度 $\pm i$ 、弯道及其它经验阻力等取值, 可由数组 $w_i = g(S_i, i = 1, 2, \dots)$ 给出(13)

正由于列车具有相当大的机械惯性, 所以, 通过调节牵引电机端电压 U_d 来调整牵引电机电流, 远快于列车的加速过程, 也就是说, 列车速度变化前, 牵引电机的电流变化已经完成(13)因此, 列车运动速度的变化由 I_o 决定(13)

当给定电流为 I_o 时, 有公式(见文献[3])

$$\begin{cases} F_{ko} = 2C_M \Phi[I_o] I_o \mu \eta_g / D_k = K_{MO} I_o, \\ K_{MO} = 2C_M \Phi[I_o] \mu \eta_g / D_k. \end{cases}$$

从有级调压系统牵引电机的动态特性, 列出牵引电机电枢回路的电压平衡方程的增量方程, 与牵引电机的轮周力的增量方程联立, 即前面所述的式(2), (4)联立, 并进行拉氏变换, 得到串励牵引电机的传递函数框图(图2):

式中参数意义为

$T_s = m/A_1 = 12 \times 10^3$ —— 速度时间参数;

$A_1 = 0.0388$ —— 速度阻力系数;

$T_{MO} = m \frac{R_o}{K_{eo} K_{MO}}$ —— 牵引电机等效机电常数;

$K_{eo} = C_e' \Phi[I_o] = 831.2 \times \Phi[I_o]$ (13)

SS3型电力机车采用恒流起动, 因此起步牵引运行时, 先给定 I_o 值, 即

$$U_r = 13 \times (I_o/800), \text{V} \quad (\text{见文献}[2])$$

(2) 可控硅装置的传递函数

可控硅装置的传递函数为(见文献[1])

$$W_k(s) = K_s / (1 + T_{SK}s), \quad T_s = 1/mf = 0.01(s) \quad (13)$$

工频单相全波整流电路 $m = 2, f = 50 \text{ Hz}$.

控制电压为8段15V, 视为 $8 \times 15 \text{ V}$, 牵引电机的满电压1550V;

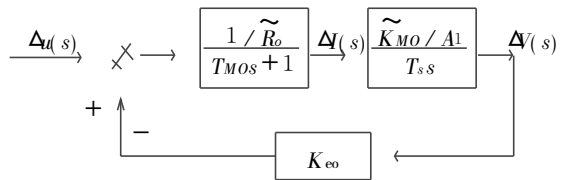


图2 串励牵引电机的传递函数框图

$$K_s = 1550 / (8 \times 15) = 12.92,$$

所以,可控硅装置的传递函数为 $W_K(s) = 12.92 / (1 + 0.01s)$.

(3) 电流调节器和电流反馈环节的传递函数

电流调节器的传递函数为 $W_{LT}(s) = K_{\omega}(1 + \tau s) / \tau s$.

电流反馈环节的传递函数为 $W_{LF}(s) = K_{LF} / (1 + T_{LF}s)$ (13) (见文献[1])

由文献[2]查得参数,计算:

$$K_{\omega} = R_{17} / R_{16} = 3.57; \tau = R_{17} C_5 = 0.2; T_{LF} = C_3 R_3 / 4 = 0.018; K_{LF} = 13.5 / 800 = 0.017.$$

代入可得电流调节器的传递函数为 $W_{LT}(s) = 3.57 \times (1 + 0.2s) / 0.2s$ (13)

电流反馈环节的传递函数为 $W_{LF}(s) = 0.017 / (1 + 0.018s)$.

(4) 速度调节器和速度反馈环节的传递函数

速度调节器的传递函数为 $W_{ST}(s) = K_{\omega}(1 + \tau s) / \tau s$.

速度反馈滤波器的传递函数为 $W_{SF}(s) = K_{SF} / (1 + T_{oS})$ (13) (见文献[1])

由文献[2]查得参数,计算:

$$\tau = R_1 C_1 = 0.072; K_{\omega} = R_1 / R_o = 1.6; T_o = R_o C_o / 4 = 0.0066; K_{SF} = U_{fm} / V_{\max} = 0.468.$$

代入可得速度调节器的传递函数为 $W_{ST}(s) = 1.6 \times (1 + 0.072s) / 0.072s$

速度反馈滤波器的传递函数为 $W_{SF}(s) = 0.468 / (1 + 0.0066s)$.

2 各环节传递函数动态结构图

将各环节传递函数连接成动态结构图如图 3 所示(13)

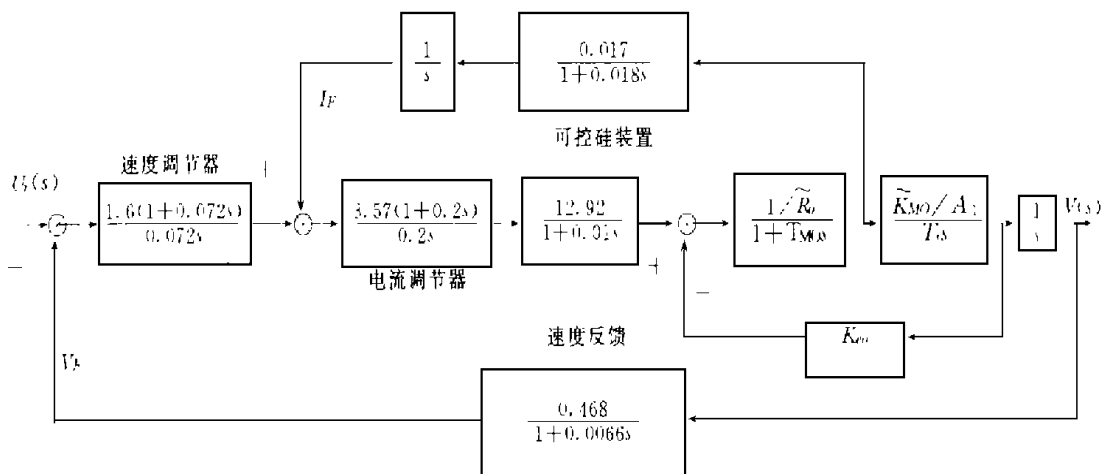


图 3 各环节传递函数动态结构图

用积分定理对 $\Delta U(s)$ 、 $\Delta V(s)$ 分别加积分环节进行积分,运算为 $I(s)$ 和 $V(s)$,再进行信号综合计算(13) (见文献[1])

3 初始值的确定及程序运算

- (1) 对于停止的列车,其初始值 $V_o=0, I_o=0, U_{do}=0$ (13)
- 将 $\beta=0.95, \Phi=f(I_d)$ 作为已知条件输入,因列车起步牵引时,不使用磁场削弱,故取满磁
场 $\beta=0.95$;
- (2) 模拟 1996 年 5 月一次下行 1458 次牵引
货车重车 $2500 \times 10^3 \text{ kg}$,列车在麦园站下行
线内停车后起步牵引过程,平道曲线半径
600 m,出站过岔后线路为曲线半径 300 m,
坡道为 3 ‰;
- (3) 根据货车平时以 500 A 电流恒流起
动,牵引运行(13)即司机手柄指令值 $U_r=13 \times$
(500/800) = 8.12 V 开始计算;
- (4) 计算步长,取 $D=0.01, \text{ s}$;
- (5) 取输出量为 $V/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}, I/\text{A}$;
- (6) 运行 CSS 仿真程序,并输出 V, I 参
数,如表 1 示(13)

表 1 CSS 仿真程序运算数据								
t/s	1	15	30	45	60	75	90	105
v $/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	0	5.7	11.2	23.9	36.5	48.7	60.4	65.3
I/A	0	500	500	500	445	392	365	358

表 2 1458 次列车起动记录数据								
t/s	1	15	30	45	60	75	90	105
v $/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	0	5.9	10.8	23.1	35.2	47.5	58.9	64.0
I/A	0	500	500	500	450	400	370	360

4 计算结果与实际运行情况的对比

与所记载的 1996 年 5 月一次下行 1458 次牵引 $2480 \times 10^3 \text{ kg}$,在麦园站内停车后再起动运行,所对应的记录数据如表 2 示(13)

根据计算结果,对比值最大误差为 3.7%,可以认为计算结果比较接近实际情况(13)见图 4(13)

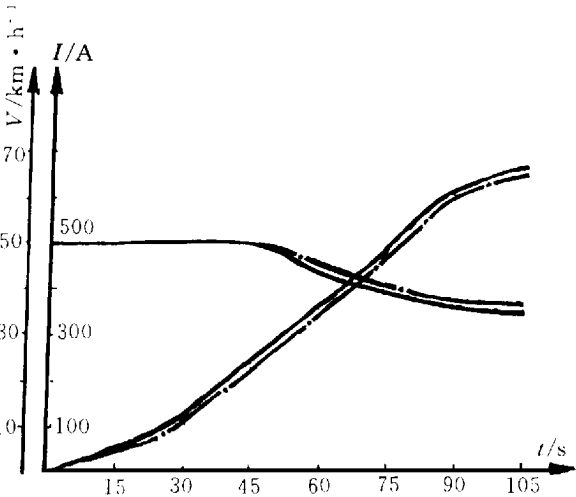


图 4 $V=f(t)$ 曲线 $I=f(t)$ 曲线

5 途中或故障运行情况的模拟计算

- (1) 若计算途中运行过程,需将所需区
段的线路坡度、曲线等各种附加阻力,列成数据组,依次输入计算;
- (2) 若需模拟坡停的运行情况,只需将在某点的牵引力为零代入牵引力方程进行运算;
- (3) 若需模拟列车冒进、冒出信号的运行情况,只需将某点制动的数据代入,进行计算(13)

6 其他各型内燃、电力机车的模拟计算

对于其他各型内燃、电力机车,只要根据机车特性参数建立起机车的传递函数形式的数学模型,并将其运行线路的参数,一并输入 CSS 仿真程序运算⁽¹³⁾

7 结束语

通过计算机运行仿真程序进行计算,模拟电力机车的牵引过程,并与实际运行结果进行对比,这就是用理论仿真的办法⁽¹³⁾

SS³ 型电力机车的控制系统的传递函数形式的数学模型,是采用了框图结构,直观、形象,一目了然⁽¹³⁾

因为仿真运算采用计算机进行,可以精确地知道任一时刻各环节输入或输出参数的数值大小,作细致的对比分析,并且可以根据校核的要求,输出所需要的参数⁽¹³⁾

通过计算机反复进行模拟列车真实情况运行的运算,验证运行方案的合理性或故障情况的真实性,具有省力、快速、安全、高效的特点⁽¹³⁾

参 考 文 献

- 1 杨自厚主编.自动控制原理.北京:冶金工业出版社,1980.36~60
- 2 刘支梅主编.SS³ 型电力机车.北京:中国铁道出版社,1990.1~18
- 3 沈本荫主编.牵引电机.北京:中国铁道出版社,1991.80~86

Simulating the Drawing-start Process of SS³ Electrical Locomotive by Transfer Function

Gu Songbin

(Shanghai Railway Administration Yongan Locomotive Depot)

Abstract By analysing the control system and drawing process of SS³ electrical locomotive, the mathematical model has been set up in the form of system transfer function. Then the drawing process is computed by using CSS simulating program. The simulating results motion of a certain train's drawing-start are compared with the real situation in this paper. In conclusion our method can be applied to the drawing calculations of other models of electrical locomotives and diesels Besides it can be used in the running scheme of increasing train's velocity to study its probability, check and raise its reasonableness.

Key words transfer function; simulating; electrical locomotive; drawing