

內燃機車駕駛自動化¹⁾

范崇惠 施頌平 余雅声

摘 要

文內介紹了采用复合控制原理和根据機車所处客观条件自动切换系統结构的內燃機車程序控制方案。介紹了按此方案制成的(自动司机)总体綫路及其性能。介紹了利用这台控制机进行內燃機車自动駕駛的全面試驗結果。文中着重討論了自动切换系統结构的邏輯裝置的設計計算。給出了綜合这类系統参数的計算公式。此外,对系統的控制质量进行了詳細討論。

一、引 言

准确地完成列車运行图,这是提高鐵路运输能力和保証機車車輛安全行駛的重要途径。機車駕駛除与機車本身特性有关外,还受到很多客观条件的影响,如載重吨数的波动、气候的变化、行駛路綫的条件不同等等。因此,保証运行图正常工作,就要求司机具有丰富的經驗和熟練的技巧。显然,要合理地解决上述問題,保証機車在最佳状态下(安全、准点和节省燃料)行駛,最好的办法是采用自动控制机以代替人工操作。这种控制机既要能够吸收熟練司机的各种操作經驗,同时还能消除人工操縱不可避免的缺点和可能产生的事故。

我們从1958年底开始,着手研究內燃機車駕駛的自动控制。于1959年7月制成一台小型控制机。这台机器完成以下任务:

1. 保証機車按时启动,并在行駛过程中經常控制機車按时刻表运行;
2. 接受道旁色灯信号的显示,并根据它們的指示,改变列車行駛状态;
3. 在機車行駛速度限制区間(簡称 $V-V$ 区間),能严格保証機車速度在預定范围之內;
4. 依据气候条件、坡道情况、載重吨数等等变动情况,自动定出合理的機車工作状态;
5. 接受进站信号后,保証預期的停車位置精度,自动进行制动—停車。

1959年8月开始进行室內模拟試驗,試驗成功之后,于同年将控制机与內燃機車組成系統投入干綫进行了全面運轉試驗。試驗行駛里程为30—50公里,試驗時間先后共計半年之久。

通过試驗,不仅証明了控制机动作可靠,性能穩定,而且还說明了所設計的控制系統具有較強抗干扰能力。在試驗过程中,用了不同的載重吨数,并选择了不同的行駛路綫,以便考驗控制系統的适应能力。最后一次試驗于1962年7月进行,試驗結果均十分良好。从这些試驗結果来看,本文所介紹的控制系統对機車自动駕駛而言,是完全可行的。

1) 本文曾在中国自动化学会1961年代表會議和学术报告会上宣讀。

这台“自动司机”具有体积小、供电系統简单、容易制造、調整、維修方便和造价低等优点。“自动司机”中不包含代替司机視感和听感的器件，因此在駕駛室內尚須有一名司机了望和检查前面綫路状态。

二、控制对象(機車)的特性

內燃機車的运动如图 1 所示。图中 B ——內燃机， Γ ——发电机， A ——电动机， J ——列車， $\mu(t)$ 代表档位，它直接控制 Γ 的轉速，最后使电动机轉矩 $\eta(t)$ 改变。令 $x(t)$ 代表機車行駛里程， y 为其速度。機車牽引方程式为：

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dy}{dt} = \xi[\eta(t) - f_r(t) - f_c(t) \pm f_w(t)], \quad (1)$$

式中： $\eta(t)$ ——機車产生的牽引力矩，

$f_r(t)$ ——与機車牽引吨数有关的機車載重阻力矩，

$f_c(t)$ ——与機車行駛綫路有关的坡道阻力矩，

$f_w(t)$ ——其他干扰产生的阻力矩，例如风向和风力的改变，晴天和雨天对機車行駛的不同影响等等，

ξ ——比例系数。

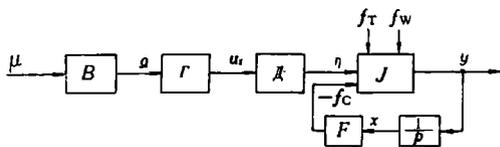


图 1.

若忽略图 1 中內燃机、发电机、电动机电枢回路的时间常数（后者与整个列車的时间常数相較很小），則 η 与 μ 和 y 間具有以下关系：

$$\eta = \Phi(\mu, y) = c \frac{\mu}{y} \quad (M_1 \leq \mu \leq M_2; \quad y_{m1} \leq y \leq y_{m2}), \quad (2)$$

式中 c 为系数，它与機車特性有关。

設 $f = f_c + f_r \mp f_w$ ，并令機車原工作点的速度为 y_0 ，档位为 μ_0 ， f 为 f_0 ，則利用小偏移綫性化概念，可得速度、档位和总阻力矩之增量 Δy 、 $\Delta \mu$ 及 Δf 之間关系为：

$$T \frac{d\Delta y}{dt} + \Delta y = K\Delta\mu - K'\Delta f, \quad (3)$$

式中 T 、 K 、 K' 各为：

$$\left. \begin{aligned} T &= 1/\xi \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^0 = \frac{y_0^2}{\xi c \mu_0}, \\ K &= \left(\frac{\partial \phi}{\partial \mu} \right)^0 / \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^0 = \frac{y_0}{\mu_0}, \\ K' &= 1 / \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^0 = \frac{y_0^2}{c \mu_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

T 及 K 为对象时间常数和放大系数。从式(4)可知，它們为原工作点的 y_0 和 μ_0 的函数。

三、机車駕駛自动化的控制方案

机車駕駛的自动控制,可以采用复合控制原理,即按机車的特点,将坡道变化与机車載重量对机車运动的影响用补偿原理加以消除,而机車的速度和時間控制則应用反饋組成閉环回路进行控制,如图 2 所示。

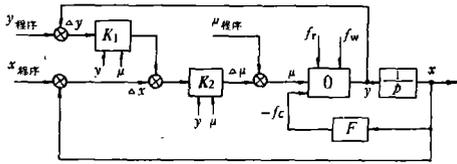


图 2.

图中 $x_{程序}(t)$ 代表里程 x 随時間的程序,而 $y_{程序}(x)$ 代表速度 y 随里程 x 的程序。在 $y_{程序}(x)$ 中还存儲了 $V-V$ 区間的速度的高限和低限数值 $y_{最大}$ 、 $y_{最小}$,以保証列車安全行駛。图 2 中 $\mu_{程序}(x)$ 是指为了滿足列車运行图的要求根据綫路坡道变化、限速条件以及燃料的經濟等而編制的档位随里程 x 的变化程序。

$\mu_{程序}(x)$ 称为列車的“基本档位程序”,图中 O 代表控制对象。

設列車載重吨数为已知,其平道行駛时所要求的速度为 y_0 ,对应的档位为 μ_0 。当速度为 y_0 时,档位在 μ_0 的基础上变动 $\Delta\mu$,与其对应的牽引力矩的增量 $\Delta\eta$ 为

$$\Delta\eta = \frac{1}{c_1} \cdot \Delta\mu, \tag{5}$$

式中 c_1 为

$$c_1 = 1 / \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^q K,$$

c_1 的值可用試驗測定。

設由于地面坡道变化,其阻力矩变动量为 Δf_c ,則当行駛綫路为已知,牽引吨数为确定数值时, $\Delta f_c(x)$ 为已知。因此,为了补偿 Δf_c 的影响,可以使 μ 随 x 預先作以下变化:

$$\Delta\mu(x) = -c_1 \Delta f_c(x). \tag{6}$$

因此,若系統不受其他干扰,而要求列車以 y_0 行駛时,便可以預先規定按下式变化:

$$\mu_{程序}(x) = \mu_0 + \Delta\mu(x). \tag{7}$$

若要求机車行駛速度以 $y_{程序}(x) = y_0 + \Delta y(x)$ 变化时,則按上述概念不难求得其对应的 $\mu_{程序}(x)$ 。在制定 $\mu_{程序}(x)$ 时,还可以参考熟練司机操縱經驗作适当的修正。

由于实际牽引吨数与估計的始終有出入,气候条件亦在变化,以及其他种种原因,致使机車按 $\mu_{程序}(x)$,实际所获得的行駛結果 $x(t)$ 与給定程序 $x_{程序}(t)$ 一定有出入,为此必須在 $\mu_{程序}(x)$ 的基础上得出一“校正程序” $\Delta\mu$,用来抵消系統各种干扰所引起的影响。由于对象特性是随机車工作点不同而改变,因而 $\Delta\mu$ 的决定就需要更多的信息来判定。在我們方案中, $\Delta\mu$ 是依据当时的 μ 、 y 及里程和速度誤差 Δx 、 Δy 来决定。用数学形式表述如下:

$$\Delta\mu = u(\mu, y, \Delta x, \Delta y). \tag{8}$$

式(8)中的 u 形式决定了图 2 所示系統的控制質量。

为了實現上述控制理想,在机車上裝有特制的測速、測距和計时装置。其中測距和計时是用断續量表示。机器的原理图如图 3 所示。图中 A 、 B 、 C 分別代表机車行駛路綫、

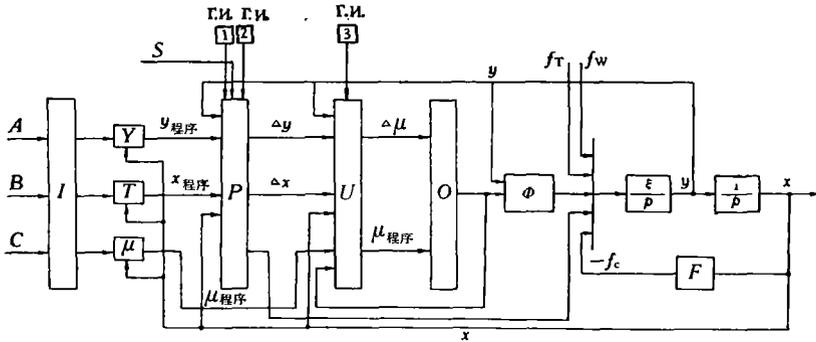


图 3.

機車特性和牽引噸數以及機車行駛運行圖等等原始資料。I 代表輸入裝置，它從 ABC 接受必要信息，然後將它們分別存入速度、時間、檔位存儲器（圖中分別用 Y、T、μ 表示）。當機車接受發車信號後，計算裝置就開始工作。計算裝置的計算速度由脈沖發生器 Г. И. 1 控制，它按一定周期計算出機車的速度誤差 $\Delta y = y_{程序} - y$ 和里程誤差 $\Delta x = x_{程序} - x$ 。圖中 Г. И. 2 脈沖發生器用作向存儲器 Y、T、μ 吸取數據和供控制計算裝置進行特殊運算之用。圖中 u 代表邏輯裝置，它的任務是根據 Δx 、 Δy 、y、μ 求得合理的“校正程序” $\Delta \mu$ 。u 的函數關係如式(8)所示。圖中 D——代表制動信號，S——代表道旁色燈信號，O——代表輸出裝置，它由若干個功率繼電器組成，直接控制內燃機車的檔位。

從動態分析觀點來看，圖 2 和圖 3 等效，圖 3 中 u 的輸出即為圖 2 中 K_2 輸出。因此實現式(8)所示函數形式，可借助改變 K_1 、 K_2 獲得， K_1 、 K_2 各為：

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= F_1(\mu, y), \\ K_2 &= F_2(\mu, y). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

圖 2 中 K_1 在個別情況下，可以為零。此時即時時間控制回路被切斷，而只採用速度控制。為了簡單和有效地按式(9)表示 $F_1 F_2$ 切換系統控制部分的特性，而將測速裝置所獲得的 y 和檔位 μ 進行水平分割。因此圖 2 中的 $K_1 K_2$ 亦是分級切換。

令圖 2 中 $K_1 = T'$ ， $K_2 K = K_c$ ， K_c 為系統預期放大係數。

設

$$\left. \begin{aligned} \frac{T'}{T} = \frac{K_1}{T} = \gamma = (1 + \Delta T) \quad (0 \leq |\Delta T| < 1), \\ \frac{K_2 K}{K_c} = \alpha = (1 + \Delta K) \quad (0 \leq |\Delta K| < 1), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 T、K 為對象時間常數和放大係數。

從式(10)可知，若 $T = T'$ ， $K_2 K = K_c$ ，則利用越前信號 y 的反饋，可以全部補償掉對象時間常數 T 的影響，而系統整個放大係數為 $K_c = 常數$ 。因此式(9)中 F_1 、 F_2 的形式可取為：

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= F_1(\mu, y) = (1 + \Delta T) \cdot \frac{y_0^2}{\xi c \mu_0}, \\ K_2 &= F_2(\mu, y) = K_c (1 + \Delta K) \cdot \frac{\mu_0}{y_0}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

若載重吨数为已知,式中 ξ, c 可以通过試驗測定. 考虑到 μ_0, y_0 实际变动的可能范围, 按式(11)可以定出 K_1K_2 分級切换規律. 从实际試驗結果可知, 利用自动切换 K_1K_2 可使系統质量获得十分良好的結果.

四、控制系統中参数的选择

若考虑增量 $\Delta x, \Delta y, \Delta \mu$ 之間的动态关系, 可将图 2 繪成如图 4a 所示. 由于 μ 实际上是阶跃变化的, 因此在图 4a 中 σ 与 μ 之間为非綫性关系, 而其非綫性函数为多級继电器特性(如图 4b 所示). 显然, 图 4b 中的非綫性特性, 由参数 λ, σ_0 及 K_μ 决定. 若令下列等式成立:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= t/T, & \bar{f} &= f/TKK_\mu, & \bar{\sigma} &= \sigma/TKK_\mu K_2, \\ \Delta \bar{x} &= \Delta x/TKK_\mu, & \Delta \bar{y} &= \Delta y/KK_\mu, & \Delta \bar{\mu} &= \Delta \mu/K_\mu. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

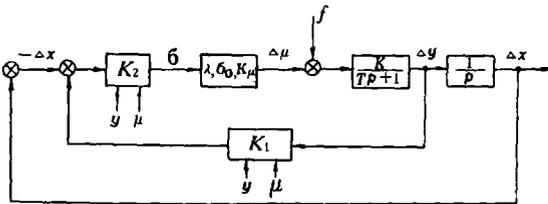


图 4a.

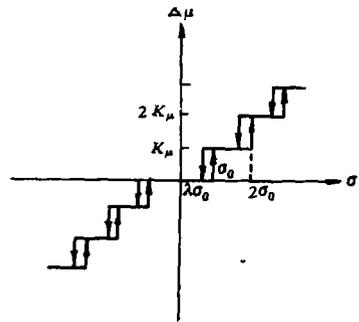


图 4b.

則图 4a 可以繪成如图 5 所示, 图 5 中的時間坐标被縮小 T 倍. γ 如式(10)所示. 图 5 所示系統其特性完全决定于 $\lambda, \sigma_0, \gamma$ 三数值的选择. 設 μ 的水平分割級数为 n , 則图 5 中 $\bar{\mu} = m (m = 0, \pm 1, \dots, \pm n)$. 图 5 所示系統可用多頁相平面进行分析. 不难証明, 保証系統自由运动的結果, 最后落入非灵敏区的充分条件为:

$$(1 + \lambda) \frac{\bar{\sigma}_0}{n} > (1 - \gamma) = -\Delta T. \quad (13)$$

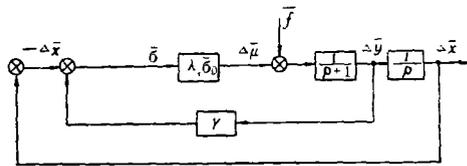


图 5.

由于 $\bar{\sigma}_0, \lambda, n$ 均为正数, 因此当 $\gamma \geq 1$ 时, 上述条件必然成立. 給定不同的 ΔT 即可得出滿足式(13)的 $\bar{\sigma}_0/n$ 及 λ 的参数区域.

今設图 5 中 $\bar{f} = -(m + \Delta \bar{f})$, $0 \leq \Delta \bar{f} < 1$. 此时, 系統应尽快一步一步使 $\bar{\mu}$ 变到 m . 然后, $\bar{\mu}$ 将在 m 与 $m + 1$ 二个数字之間来回摆动(即系統进入滑动状态), 以便抵消 $\Delta \bar{f}$ 的影响. 如果适当提高 n 的数值, 則其摆动幅度可減至所希望的最小可能值. 摆动

周期 T_0 的选择, 应考虑到系統最大誤差允許值及控制对象的特性. 令 τ_0 代表系統开始进入滑动状态的時刻, T_0 为滑动周期, 因此可以算得 τ_0 、 T_0 为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= (\bar{\sigma}_0 \pm \Delta\bar{\sigma}_0) \sum_{i=0}^m \left[\frac{1}{i + \Delta\bar{f}} \right], \\ T_0 &= \frac{(1 - \lambda)}{\Delta\bar{f}'(1 - \Delta\bar{f}')} (\bar{\sigma}_0 \pm \Delta\bar{\sigma}_0), \\ \Delta\bar{f}' &= \Delta_f(1 \pm \Delta T), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $\bar{\sigma}_0$ 对应系統中 $K_2K = K_c$ 的情况, $\Delta\bar{\sigma}_0$ 反映系統放大系数偏离預期 K_c 的波动量, ΔT 反映系統中時間常数的波动. 由于对象特性随工作点不同而变动, 且系統中 K_1K_2 又是分級切换, 因此必須考虑 ΔT 及 $\Delta\bar{\sigma}_0$ 的影响. 从式(14)可以計算出 ΔT 及 $\Delta\bar{\sigma}_0$ 对 τ_0 及 T_0 的影响. 由于系統处在滑动状态, 因此 $\Delta\bar{x}$ 的变化, 当稳定后亦为振蕩 (如图 6 所示). 图中 $\Delta\bar{x}(\infty)|_{\text{最大}}$ 及 $\Delta\bar{x}(\infty)|_{\text{最小}}$ 各为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\bar{x}(\infty)|_{\text{最大}} &= m(\bar{\sigma}_0 + \Delta\bar{\sigma}_0) + \Delta\bar{f}'T_0(T_0 - 1), \\ \Delta\bar{x}(\infty)|_{\text{最小}} &= m(\bar{\sigma}_0 + \Delta\bar{\sigma}_0) + (1 - \Delta\bar{f}')T_0(1 - T_0). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式(13)一式(15)可以作为选择系統参数的依据. 例如按系統質量要求可定出其滑动周期, 結合測試对象所得特性和自动切换回路的动作情况, 可定出 $\Delta\bar{\sigma}_0$ 及 ΔT 的波动范围. 然后应用式(13)一(15)求得系統所有参数, 再将所得参数数值进行計算并經過試驗作适当調整后, 即可获得滿意的結果.

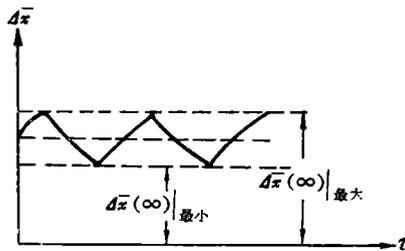


图 6.

在实际測試对象特性时, 可以看出其具有滞后現象. 其滞后時間 T_r 与对象時間常数 T 之比 Δ_r 一般均小于 0.1. 为了补偿滞后時間 T_r 的影响, 可将速度反饋量提高. 当 $\Delta_r < 0.1$ 时, 为了抵消 Δ_r 的影响, 速度反饋量亦需提高 $\Delta T = \Delta_r$. 在試驗时, 应用提高速度反饋来补偿对象滞后的影响获得了显著效果.

五、試驗結果分析

試驗包括从列車始发站的自动启动到終点站按时进站、停車的全部自动化試驗. 行駛距离为 30—50 公里. 在选定的行駛路綫中有若干段为 $V-V$ 区間. 試驗結果令人滿意. 图 7、8、9 所示为部分試驗結果, 它們表示使用同一档位程序但处在不同干扰下的控制結果, 图 7 为輕車試驗結果, 图 8 为重車試驗結果, 二者牵引吨数相差約 50%, 而其他条件如档位、時間、速度程序均相同. 其所以获得良好的效果, 主要是依靠了系統的邏輯装置(即自动切换 K_1K_2 装置)的作用.

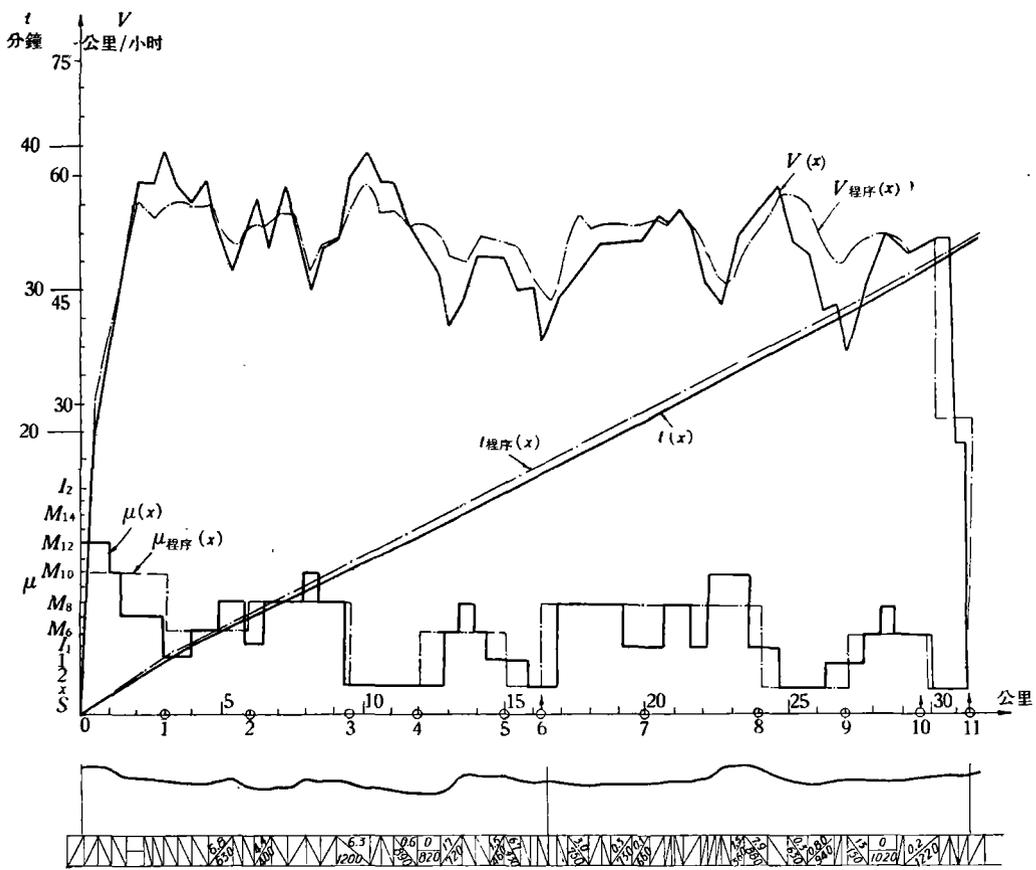


图 7.

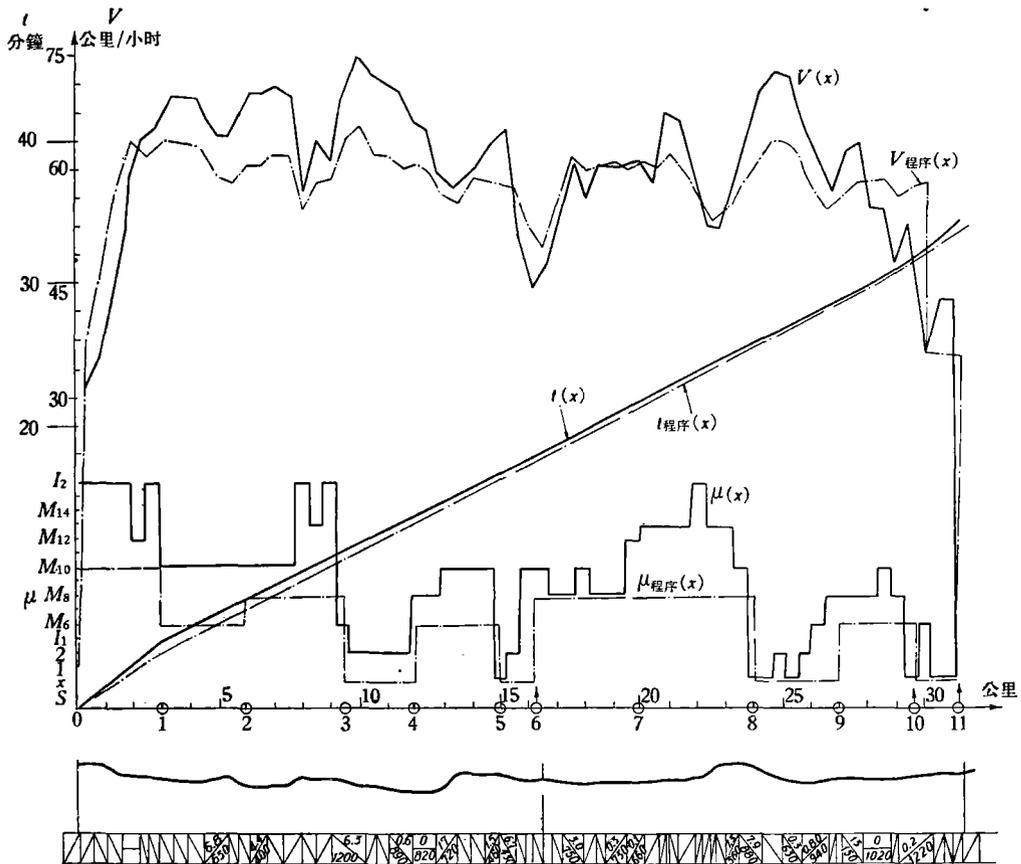


图 8.

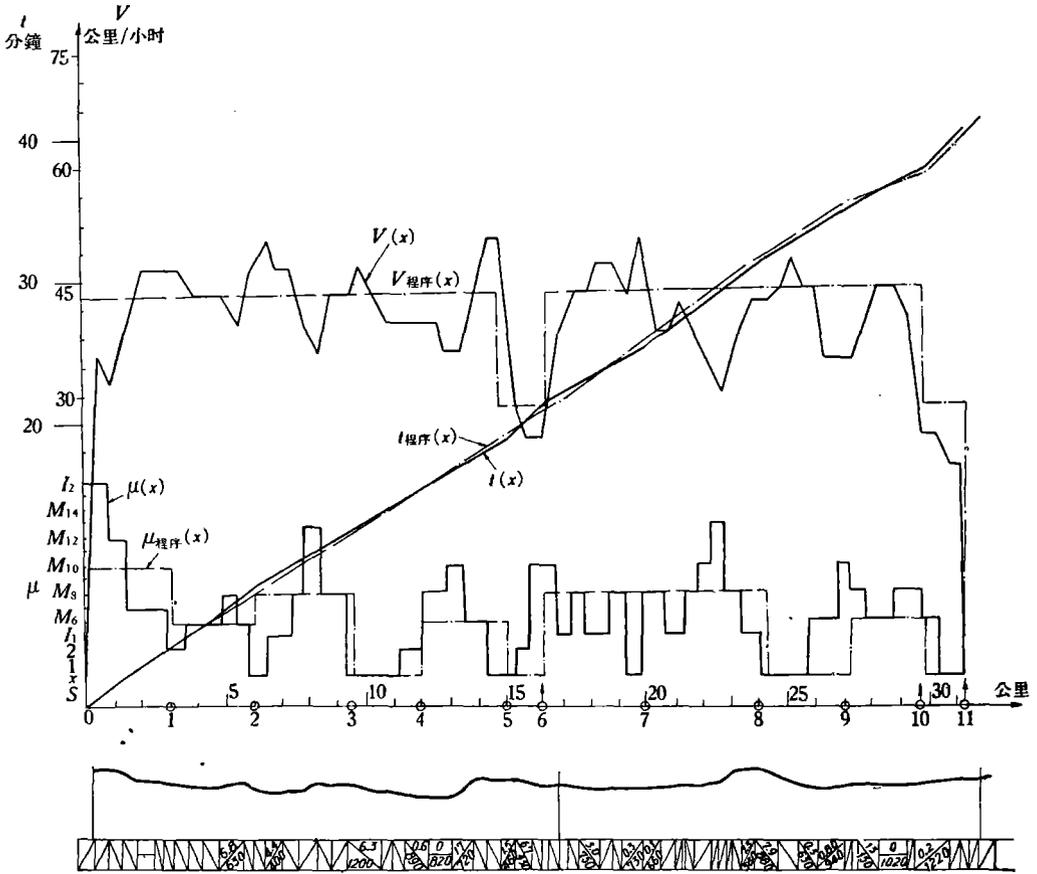


图 9.

图 9 所得試驗記錄曲線,是在牽引噸數及檔位程序与图 8 相同、但程序速度和程序時間 $x_{程序}(x)$ 任意給定下获得的。从試驗結果来看,其控制效果仍極理想。在进行进站停車位置精度的試驗中,我們采用了使列車預先將速度低至一定範圍內,然后使其按預先規定了的制動曲線(制動時速度与距离的关系曲線)进行制動,也获得滿意結果。

六、結 論

1. 应用复合控制原理,机車自動駕駛采用了“自动改变系統結構的程序控制系統”,从實驗中証实,此方案具有一定优点。按此方案制成的控制机体积小,工作可靠,供电系統簡單和造价低。
2. 机車作为控制对象,它具有大的慣性、大的滞后和大的非綫性度,同时又承受大幅度的干扰。为了提高控制系統質量,利用自动切换控制部分特性的概念来补偿对象特性因其工作条件不同而引起的变动性質,是有效的。
3. 对控制对象的特性作必要測試后,就能确定描述对象特性的参数变动范围。根据系統控制質量的要求,利用文內得出的計算公式,可以定出系統中的全部参数。
4. 提高系統速度反饋量,对补偿对象中的滞后現象有着显著的作用。

参 考 文 献

- [1] 洛斯庫托夫, В. И., 鐵路運輸上的数学和控制机器, 孙振声譯, 司徒鎮国校, 铁道科学技术(信号通訊类), 1959, № 2, 17—20.
- [2] 埃列尔, А. А., 罗斯兰納斯, В. С., 控制列車行駛的自动化, 張錫斌譯, 王填勤, 司徒鎮国校, 铁道科学技术(信号通訊类), 1959, № 2, 13—17.
- [3] 洛斯庫托夫, В. И., 自动司机, 孙振声譯, 司徒鎮国校, 铁道科学技术(信号通訊类), 1959, № 3, 9—12.
- [4] 莫伊謝耶夫, В. Д., 尼科拉耶夫, Н. С., 计算机及其在鐵路運輸中的应用, 張錫斌譯, 司徒鎮国校, 铁道科学技术(信号通訊类), 1959, № 3, 4—9.

AUTOMATIC CONTROL OF DIESEL LOCOMOTIVE

FAN CHUNG-WEI, SHIH SUNG-PING, YÜ YAUN-SUN

This paper presents an investigation of the "Automatic Operator" of Diesel Locomotive based on the principle of compound programming control. According to the surrounding conditions of locomotive, the "Automatic Operator" can change its structure automatically in order to obtain better quality of control.

In this paper, the principle scheme, the characteristics of "Automatic Operator" and the experimental results of automatic control of Diesel locomotive with "Automatic Operator" are presented, the principle and the design of logical circuit for changing the characteristics of "Automatic Operator" is emphasized. The latter part of the paper includes a discussion of quality of control; and finally, formulas for determining the parameters of the control system are derived.