

译者序

随着我国四个现代化建设事业的迅速发展，特别是微处理器和微计算机的推广应用，国民经济各部门包括交通运输系统将愈来愈多地采用和实现自动化。自动化不仅将有效地提高社会生产率，而且还由于现代生产过程在快速性、精确性和效率等方面向人们提出了非常高的要求，使得自动化更加成为不可避免的。有时为了预防对人体的有害作用，在某些场合也必须采用自动化装置。

以电传动为基础的城市交通和铁路运输的自动化将大大提高这些系统的运营指标，铁路运输系统的初级自动化形式是单台机车车辆的车载式自动控制设备，包括“自动化司机”在内。为了提高安全运行水平的同时增加某一区段或地区的通过能力，特别是在繁忙的市郊运营线路或干线铁路上，将采用集中控制和调度的综合自动化系统，从而能够按照最佳经济原则远距离操纵在该地区的所有机车车辆和列车的运行。

由于机车车辆上电传动系统的自动控制装置是在比工业和能源中应用的类似装置远为困难的条件下工作的，对元件和系统提出了更高的技术要求。本书系统地把自动控制理论运用在电力机车车辆——电力机车和电动车辆上，进行以牵引电机为控制对象的自动化系统的分析和综合。

全书共分十二章。首先以大量篇幅讨论了电传动的线性自动调节系统的功能图、功能单元、静态和动态特性、稳定性判据和调节质量。然后叙述了自动调节系统的综合与设计方法，并简要地讨论了电传动的非线性自动调节系统的特点。书中所用有关自动控制的概念和方法主要依据古典自动控制的基础理论。书的最后三章着重结合铁路电传动机车车辆进行分析，并以具体例子论述了这种自动控制系统的设计和元件特性。

易友祥等同志对本书译稿进行了校阅，并提出宝贵意见，顺致谢忱。

本书对原书的序进行了摘译。由于译者水平有限，错误在所难免，热切希望广大读者批评指正。

译者

1986.12

3685/10

自动控制系统。

由于电力机车车辆自动控制装置的工作条件比工业和能源设备中的类似装置困难得多，这就使人们不得不提高对机车自动系统和元件的技术要求，并寻找特殊的建设性的解决办法。

电力机车车辆上的自动控制系统是铁路运输联合自动控制系统的一个组成部分，它的使用大大提高了车辆的效率。就铁路运输联合自动控制系统本身来说，它作为部门的集中控制系统，包括全国性的信息收集和处理的集中管理系统。自动控制系统是以随着现代计算机的应用而广泛采用的经济——数学方法，及高度的组织技巧和通信工具为基础的。

前 言

建设共产主义物质、技术基础的必要前提应以大大提高劳动效率为基础。在生产、运输及其它领域中采用自动化装置，也就是自动化，在很大程度上对其起了促进作用。

不仅仅为提高社会劳动生产率而需要搞自动化。由于人总不可能足够迅速、精确、有效而且安全地操纵各种工程装备，使之达到完善的程度。尤其现代技术的许多过程以及人类活动的其它领域，对人们提出的要求更是人力所不能做到的。而自动化扩大了人们对系统的控制，并消除了与系统缺陷有关的若干限制，因而自动化成为不可避免的并且是现代科学技术革命的重要组成部分之一。

就预防有害作用的劳动保护条件来说，搞自动化往往是必须的。譬如说，不最广泛地采用自动化就不可能有现代化的原子工业和能源工业，不可能有宇宙开发以及科学技术在一系列重要方面所取得的进展。

现代自动装置已远远超越工业生产技术的范围。它被广泛应用于各种形式的运输业、农业和医学中，也被用于编制各级计划、科学试验和别的许多领域。

在管理范围内也全部或部分地采用代替人工的技术装备时，就可能继续大大提高劳动生产率。这种技术手段把人从毫不停歇的管理中解放出来，而只把运行过程中的调整、调度和监视工作留给人来管理。

在综合自动化的情况下，为实现所讨论的过程必须将全部技术装备搞成自动化。通常按照多级原则（等级制）来实现自动化，当单独的技术装备自动化后再完成综合体内部相互关联的自动化，也就是更高一级的自动化。

发展综合自动化应建立下列几个等级：即生产工段、企业、国民经济各部门管理的自动化。

铁路运输综合自动化的发展前景是其所有环节的彻底自动化，以及在此基础上建立起整个运输业的统一自动控制系统。机车控制的自动化是这个系统第一级中的一个。随着列车运行速度的提高，其必要性更增大了，因为那时司机已经不能完整地执行各种驾驶功能了。自动控制系统承担了列车在高速运行时司机不能胜任的工作。

我们可以采用每台机车都独立的自动控制系统，亦称为《自动司机》系统。但是，此种系统只在提高运行安全水平的同时增加区段或某方面的通过能力是不够的，还必须过渡到集中（联合）自动控制系统，能够对运行于一定区域内的所有列车和机车进行远距离控制，即遥控时，所提的任务才可以成功地解决。

这种系统的运营和经济意义随着货流和客流的提高而增大。整个运输系统而不是对单台机车的综合控制的必要性，使得原先已采用了机车自主式自动控制系统的莫斯科地铁，也改为集中自动控制系统了。

任何自动控制系统在技术经济上的合理性取决于对它们提出的任务，这将造成自动控制系统的很大差异。在特别需要的那些地方，亦即在繁忙的市郊运营线路和地下铁道上首先采用这种系统。今后在干线电力机车，特别是在高速电力机车和电动车辆上也将广泛采用综合

目 录

第一章 自动控制原理	1
一、过程控制原理.....	1
二、生产和运输过程中的自动化程度.....	2
第二章 电力机车车辆控制过程的特点	6
一、不同自动化程度下列车运行的控制作业.....	6
二、电力机车车辆自动调节系统的调节对象及调节性能.....	8
三、电力机车车辆自动调节和自动控制条件的特点.....	11
四、电力机车车辆自动化技术的经济效果.....	14
第三章 自动调节系统的功能图	16
一、功能图和功能单元的概念.....	16
二、自动调节系统的典型功能图与调节原理.....	18
三、自动控制系统的分类.....	19
四、电力机车车辆自动调节系统的功能图.....	23
第四章 电力机车车辆自动控制和调节系统的功能单元	28
一、单元的一般特性.....	28
二、电力机车车辆自动控制系统的给定单元.....	30
三、电力机车车辆的感觉单元和传感器.....	31
四、放大器.....	33
五、逻辑运算和计算作业的单元.....	38
六、变换单元.....	46
七、执行单元.....	49
八、电力机车车辆自动调节系统典型单元的选择原则.....	51
第五章 自动调节系统的静态特性和动态特性	53
一、系统的静态特性.....	53
二、系统的运动方程及求解方法.....	55
三、系统动态分析所用的特性.....	59
第六章 自动调节系统的结构图	63
一、动态系统的结构图与环节.....	63
二、结构图的绘制与变换法则.....	69
三、作为线性化调节对象的牵引电动机的结构图和传递函数.....	73
四、开环与闭环自动调节系统的结构图和传递函数.....	78
五、开环与闭环自动调节系统频率特性的绘制.....	83
六、线性化的电力机车车辆自动调节系统的结构图与传递函数.....	85
第七章 线性自动调节系统的稳定性与调节质量	89
一、稳定的概念和稳定性判据.....	89
二、由典型动态环节组成的自动调节系统稳定性的研究实例.....	95

三、稳定性裕度与稳定范围	98
四、调节过程质量的概念和标准	100
五、自动调节系统稳态时的工作精度	102
六、计算过渡过程的频率法	106
七、评价调节质量的间接法	108
第八章 自动调节系统的综合	111
一、综合任务的一般特征及校正原则	111
二、按对数频率特性综合校正环节	116
三、电力机车车辆自动调节系统的综合特点	120
第九章 非线性自动调节系统	122
一、非线性元件	122
二、牵引电动机——非线性调节对象	124
三、电力机车车辆的非线性自动调节系统及其研究与计算方法	127
四、具有非线性环节的电力机车车辆自动调节系统的综合	135
第十章 电力机车车辆自动驾驶原理	137
一、自动驾驶系统的用途和应用范围	137
二、电力机车车辆的最优控制原理	138
三、电力机车车辆自动控制的算法和程序	139
四、电力机车车辆在牵引状态下的控制算法	140
五、电力机车车辆制动时的控制算法	142
六、自动驾驶时列车运行的准确性	144
七、列车自动停车的准确性	147
八、自动驾驶系统的可靠性	149
第十一章 电力机车车辆的遥控原理	151
一、遥控系统的结构	151
二、远距信号的形成和传递	153
三、传送远距信息的条件和编码	161
四、机车遥控系统	164
五、机车的自动遥控调度系统	166
第十二章 电力机车车辆的自动驾驶系统	168
一、列宁格勒地下铁道列车的自动驾驶系统	168
二、莫斯科地下铁道的列车自动驾驶系统	171
三、莫斯科地下铁道列车自动驾驶系统的单元	173
四、电力机车和电动车辆的自主式自动驾驶系统和自动驾驶系统	177
附录1. 基本函数的拉普拉斯表达式	182
附录2. 拉普拉斯变换的若干性质	182
附录3. 典型梯形过渡函数 $h_s(\tau)$ 表	183
附录4. n 由 1 ~ 4 的积分式 I_2 表示表	184
附录5. 校正用主要无源四端网络	184
附录6. 典型环节模型电路	186

第一章 自动控制原理

一、过程控制原理

保证被控制过程达到规定预期结果的、有明确目的之行为称为控制。一般认为，被控制的过程（如列车运动、发电机运行、某种工艺过程等）在时间或空间上是变化的。控制就是使这种过程按要求的方向去变化。

在工程装备和系统中，被控制的过程是物理现象或它们的总合，改变所控制装备的状态，就能够改变它们的进程。被控制的技术装备如电动机、列车、机床，称为控制对象。

控制的概念已经扩展到各种过程的很大范围内。由于控制在生产中的作用不断增大，就使我们更有兴趣去研究和科学地总结它在各个不同领域内的规律。在工艺、技术组织、一般社会、生物以及各种不相同过程的控制中，我们发现了它们的许多共同之处。由此出现了一门学科——控制论，它的研究目标是应用于任何领域普遍的控制理论，而不考虑这些对象的物理本质和用途。

对技术装备的控制理论称为工程控制论。它的原理是以自动控制和非自动控制理论为基础的。

任何控制过程都可分为几个独立的基本部分，称之为作业。根据各具体内容，这些控制作业很不一样。它们又可分为明显不同的两类：实现能量变换的一类（动力的或执行的）和实现信息变换的一类（控制的或调度的）。

非自动控制时，操作者使控制机构动作起来即为操作者进行的执行作业。在此情况下，调度作业包括收集被控制过程中的信息、分析这些信息并详细拟定控制程序（算法），也就是实现执行作业的顺序。在控制机车和列车运行时，司机的调度作业是观察道路、信号、机车和列车的状态，查看各种测量仪表和指示器的读数，考虑列车运行的控制程序；而执行作业则是使控制器、司机开关、按钮开关以及其它电器和设备动作起来。

自动控制时，也划分为类似的作业。这里，所有控制过程中的信息和外界对此过程影响的信息之有关作业均属调度作业。同时也应实现信息的加工、分析并拟定对执行装置的作用。

在非自动控制以及自动控制中，全部调度作业都包括对信息的检测、积累、分析和加工。但自动控制装置只能在信息具有物化形式时才能进行这些作业。也就是说，信息应表示（描述）为物理过程（如电流）的某个数量指标（如电压、电流强度）。《承载》信息的物理量，其数量指标照例是与信息值成正比的，此物理量称为信号。例如，流入安培计测量分流器强电流的信号就是这个分流器的电压降，它正比于回路中测得的电流。

在自动化装置中，所有调度作业都是对信号的作业。各种信号的用途及特征是很不相同的，应根据其直接用途进行区分。参与控制过程的信号称为控制信号；把控制过程运行的信息引进控制装置的是给定信号，给定信号的数值是根据控制过程预定的特性确定的。但是，控制过程的实际进行情况可能与给定的情况有明显的不同，这是由于未加观测和未加控制的

各种因素对控制过程产生了影响，这些影响因素就称为扰动。扰动特征及对控制过程的影响程度，是各种各样的，它们通常是不受调节的、偶然的，此时称之为干扰。

自动化系统中有一大部分是用来不断地补偿扰动对控制过程的最大影响。为了解决这个问题，控制系统中应加入两种类型的信息：初始信息和工作信息。初始信息包括过程进行的预期数据、与之有关的不大的和有规律的扰动数据；工作信息包括代表被控制过程实际进行情况数量指标的有关数据，有时还有重要扰动的有关数据。工作信息由反馈信号传来，也就是由控制对象加到调度装置中去的信号。在非自动控制系统中，反馈信号也是必须的。这种信号的作用随着扰动对被控制过程影响的加强而增大。

工作信息和初始信息的信号变换属于调度作业。随着控制系统的改进，这些作业范围不断扩大，在控制过程中信息的作用以及多方面对它处理的必要性也增大了。

执行作业应当实现所选择的顺序——控制算法。通常它们只是全部基本控制作业的一小部分，并随着技术的发展而不断减少。试验资料分析结果表明，机车乘务组完成了近72%的基本的调度作业和28%的执行作业。当列车由现代机车（电力机车和内燃机车）牵引时，全部作业的93%以上属于调度作业，而只有7%属于执行作业，这符合减轻体力劳动的要求。

对几个对象一起进行自动控制的所谓协同控制方法也不断扩大使用。这种控制方法不仅对每个对象的控制自动化，而且也使它们在工作过程中协调动作。

技术装备工作的具体过程具有不同的特性。如果过程是在操作者或自动化装置不对它施加连续影响的情况进行的，则称之为自由过程。自由过程的特征主要与控制对象的性能（特性）有关。

二、生产和运输过程的自动化程度

在较长的时间内，自动控制系统得到了发展和改进，它所实现的功能逐渐变复杂了。随着其功能的不断复杂，这种系统可以分为若干不同的类型。自动控制装置实现控制功能的复杂程度，通常是用过程自动化的程度来评定的。随着自动化程度由低水平到更高水平的发展，所使用的全部低水平自动控制元件也随之达到更高的水平。

过程的自动联系及其制约属于低级的、初始的自动化程度。联系的实质在于一个或一些过程通过自动控制手段与另一个或另一些过程发生关系。当要求一些同时进行的过程在顺序上精确配合，而操作者又难于或不能连续观察其进行情况时，这种自动联系就是必要的。

过程的自动联系有不同的类型，我们只讨论电力机车车辆所用类型中的一种，其中有时序的联系和函数的联系。

时序联系的实质是，任何过程的起始和（或）结束都是由另一个（另一些）过程的起始和（或）结束决定的。

实行这种办法的实例见图1—1，在电流回路1、2、3中接有三个配电器（例如接触器），它们之间有自动时序联系。当沿控制回路 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 向线圈 K_1 、 K_2 、 K_3 供电时，它们的触头闭合。由接触器1的控制触点（联锁触点） B_{12} 、 B_{13} 和接触器2的触点 B_{23} 实现这种联系。当接触器1接通时，它的两个常闭触点先闭合；触点 B_{23} 是断开的，它要在接触器2断开时才闭合。接触器2、3只有在接触器1接通后才能接通，而接触器1断开时，接触器2、3也断开了。接触器2的接通使接触器3亦断开。

在电力机车和电动车辆的控制系统中，即使机车的牵引和制动过程不是自动化的，时序

联系也是十分必要的。它由联锁触头系统来实现，后者保证控制系统中所要求的转换顺序。

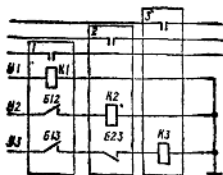


图 1—1 配电柜接通回路的时序联系

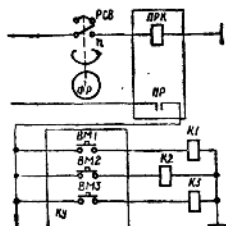


图 1—2 电力机车辅助电机接通的函数联系

在函数联系的情况下，某个（某些）过程的起始和（或）结束都是依据其它过程达到的某个给定的数量指标，以自动化的手段安排的。函数联系的例子见图 1—2——接通由机械式变流机供电的电力机车的辅助电机，机械式变流机应在无载时起动。由于转速继电器 PCB 和劈相机 ΦP 的轴相联结，则继电器的触点接通中间继电器 $ПPK$ 的线圈。当此继电器的触点 $ПP$ 闭合时，在按钮开关 KY 的供电回路中可以由按钮 $BM1$ 、 $BM2$ 、 $BM3$ 等向辅助电机的接触器线圈 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 等供电，也就是接通了相应的电机。这样，辅助电机的接入就是根据劈相机达到的转速 $n \geq n_1$ 进行的（ n_1 为与 PCB 继电器整定值相对应的给定转速）。

在自由状态时（参见第一章第一节）无需连续进行控制，但要求遵守已知的各种限制条件。例如，对于牵引电动机来说，应当保持如下关系

$$I \leq I_n \kappa_{...} = I_n \kappa_{...} \kappa_{..} \quad (1-1)$$

式中 I_n ——电动机额定电流；

$\kappa_{...}$ 、 $\kappa_{..}$ ——电动机运行过载系数和结构过载系数；

$\kappa_{..} < 1$ ——考虑运行中负载特点的裕度系数。

对其它设备部件按其指标也有类似的限制。为减少不正常工作状态（事故）的后果，这是必要的。

在现代工程系统中，必须采用自动装置来保证对自由过程的限制，这是因为操作者不能连续地观察复杂过程的许多指标，特别是过程快速进行时。大部分电器和保护系统都是为了自动限制自由过程的，没有它们就不能保证一些复杂对象，如电力机车和电动车辆的工作能力。

过程联系和这种制约水平的自动化，已经广泛应用于各种不同的技术部门，电力机车和电动车辆的控制系统也包括在内。这里，相应的装置自然地和控制系统融合在一起，以致不再把它们看作是自动控制装置。

在过程控制中任何一个表征过程的物理量，能够在没有人直接参与而按要求规律变化的这种过程控制称为自动调节。调节既可以按一个物理量，也可以按若干个物理量进行，这些物理量称为控制过程的数量指标。自动调节多半是按一个指标进行的，其变化规律应用数学方法表达。

广泛使用的自动调节其指标 x 的规律为

$$x(t) = x_a = \text{常数} \quad (1-2)$$

式中 $x(t)$ ——指标 x 随时间 t 变化；

x_* ——指标 x 的恒定值。

这种调节称为量 $x(t)$ 的自动稳定。在电力机车车辆上, 控制发电机的电压就采用这种调节。实行不精确的近似 (分级) 调节就简单多了, 限制自由过程的调节原理如图 1-3 所示。电力机车车辆的起动工况就是这种调节。此时

$$\left. \begin{aligned} I_{cp} &\approx I_p \approx \text{常数} & I_* &= \text{常数} \\ I_{cp} &\approx 0.5(I_* + I_p) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 I_{cp} 、 I_p ——起动电流的平均值和期望 (计算) 值;
 I_* ——由一个自由状态到另一个自由状态 (由一个起动级转换到另一个起动级) 的转换电流值。

如果所要求的调节指标值不是恒定的而是变化的, 比如随时间变化, 那么, 这种调节称为程序调节。它也可能是精确的 (平滑的) 或近似的 (分级的)。对于自动调节来说, 必须给定所要求的调节指标的变化规律。与其它调节系统一样, 分级调节可以看作是过程调节指标保持在给定范围内的调节系统。

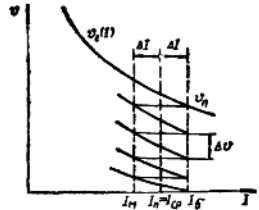


图 1-3 分级起动调节图解

这种自动调节系统的功能比前述的复杂。随着运输技术设施的发展, 采用自动调节已是必然的了。

各个过程采用自动调节, 它们之间又是自动进行联系的就是对象的自动综合控制。在综合自动化系统中, 还加入了使各个过程与所有对象的工作自动优化、相互协调的单元。

在一般的自动调节系统中, 当工作条件改变时, 操作者必须重新调整系统。此时一般不改变调节规律, 而只个别地变更一下它的数量指标。由操作者进行调整, 不能保证调节过程精确、无误和及时的变化, 不能保证被控制对象最合理 (最优) 的工作。所以, 在综合自动控制系统中自调整的自动调节系统或过程自动最优系统日益得到推广。能够从若干最有利的调节规律中选择或拟定最有利调节规律的自动调节系统就属于这一类。综合自动控制系统愈完善, 其中自动优化元件的应用就愈广泛, 在干扰严重的场合尤其重要。

与自动调节相比较, 综合自动控制系统是更高水平的自动化。它们最有前途并广泛地应用于国民经济的各个领域。

在苏联和国外, 在各种类型的机车上已经研究并应用了综合自动控制系统——称之为自动控制系统。《自动司机》系统即属于此种系统, 虽然不要求它完全代替司机, 但可大大减轻司机的劳动, 提高了行车安全并使其过程优化。

广泛用于各种技术的机器人也可列入这类系统。机器人是按照对某些过程的综合自动控制原理控制的独立 (自主) 式的技术装备。机器人具有完成各种执行作业以及复杂调度作业的能力, 在某些场合下它可以代替人——操纵者。

对若干个对象的协同综合自动控制 所讨论的这种自动化涉及的是一个对象或是对象总体, 它们是功能和区域的统一体。例如, 实现同一个工艺过程的所有机床的总体。但是常常需要对若干个自动控制对象进行协同控制, 这些对象是相互隔开、在功能方面没有共同性的不同类型的系统。在某些场合下 (例如列车), 控制对象没有固定的分布地点而是不断转移着。

对象或系统之间相互作用的自动化称为协同自动控制。这种系统通常是根据等级控制原

第二章 电力机车车辆控制过程的特点

一、不同自动化程度下列车运行的控制作业

机车和列车运行控制过程的内容与其自动化程度有关。自动化对控制的执行作业没有实质的影响，但会明显地影响调度作业。

我们讨论一下列车的非自动控制过程（图 2—1）。为简化起见，这里不包括对辅助设备的控制，列车运行的控制是诸如对牵引电动机 $T\Pi$ 和空气制动 ΠT 的控制。

司机 M 的执行作业是把控制作用 $g_{r..}$ 和 $g_{r..}$ 相应地加在牵引电动机的控制装置 $YU\Pi$ 和制动控制装置 YUT 上。控制装置 $YU\Pi$ 改变牵引电动机的端电压 U_r 或励磁调节系数 β ，从而对其工作产生影响。同样地电动机 $T\Pi$ 把所发出的牵引力 $F(I)$ 作用到机车 Π 上而改变其速度 v 。控制装置 YUT 改变制动风缸中的压力 p ，对制动器 ΠT 产生影响。作用在列车上的制动力 $B(p)$ 是由风缸压力决定的。

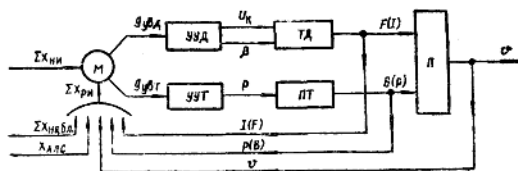


图 2—1 列车运行非自动控制框图

在机车和列车运行的控制过程中，司机首先完成调度作业。他得到并处理有关机车和列车状态的信息，以及影响运行过程外部条件的信息。根据这些信息，司机控制 $g_{r..}$ 和 $g_{r..}$ 作用，以达到控制目的——实现运行图。

在信息中包含表征控制目的（时刻表、运行图等）的初始条件 $\Sigma x_{..}$ 以及主要的工作条件（列车重量与组成、限制速度等）。不系统地接收有关列车实际运行过程的信息 $\Sigma x_{..}$ 、 $x_{..}$ 及机车工作和运行条件改变的信息，就不可能控制列车。由图 2—1 可见，工作信息以信号形式沿反馈回路由控制对象到达操作者——司机。不反馈给操作者，就不知道控制作用产生的结果如何，实际上也就不可能进行控制。

为了选择控制作用，司机分析所得到的工作信息，把它与初始信息相比较，并考虑作用在列车上的扰动。扰动是使工作条件发生变化的不可控且各不相同的作用因素。司机首先遇到的是有规律的扰动，在所讨论的控制过程中通常一次性发生的那些既定的扰动就属于这一类，例如列车重量与规定的重量标准值的差异。偶然的扰动（干扰）最常发生，这种扰动不受监督地改变工作（列车运行）条件，并具有偶然的、不可控的特点。例如，受电弓上电压 U_r 的变化、粘着系数 ψ 的变化、坏天气的运行阻力 w 的变化和其它等即属于这一类。司机应尽可能

考虑到这类扰动，力求防止它们对列车运行的影响。由司机拟定的控制算法愈准确，它所能接受和处理的工作信息量就愈大。

要想精确实现基本的控制目的——实现运行图，也就是在各区间按给定的时间 T 运行，需要进行复杂的计算才能确定过程中各种指标的数量关系。在此情况下，这种运算可以表示为

$$T = \int_0^L \frac{dl}{v(l)} \quad (2-1)$$

式中 L ——区间长度；

dl ——线路单元；

$v(l)$ ——相应 dl 的运行速度。

司机不可能进行这种数学运算，所以时间 T 只能近似等于 T

$$T \approx T = \sum_{i=1}^n l_i / v_{i, \text{cp}} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2-2)$$

式中 t_i ——区间中各个有代表性路段的通过时间，每单元段长度为 l_i ，单元段总数为 n ；

$v_{i, \text{cp}}$ ——在区间各路段上的平均速度。

t_i 和 $v_{i, \text{cp}}$ 值的初始信息 $\Sigma X_{i,0}$ 是司机根据以前的列车试验结果和操作工艺图表得到的。司机已经不是按照数学而是用更简单的逻辑运算来拟定控制算法了。这种逻辑运算乃是定性地估计工作信息数据符合或不符合初始数据，司机应优先比较数值 t_i 和 $v_{i, \text{cp}}$ 。

即使这样简化，非自动控制时由司机完成的调度作业也是十分复杂的。它不仅应该接受和处理大量的信息，还必须拟定包含许多作业的复杂的控制算法，其中每一项均属于某个固定的控制级（控制器级位）。

当需要准确地把控制过程的某个指标（如起动电流）保持在给定范围内，也就是调节这个过程时，司机的工作更特别复杂。一般，在一定的条件下，例如调节电动车辆的起动，司机不能胜任这项任务，而必须借助于自动调节系统CAP。

于是，在所有电动车辆上装设了自动起动调节系统CAP-ПД（图2-2），起动时此系统把牵引力 F ，确定的给定电流值 I ，与实际电流 $I(F)$ 加以比较。为此，在自动起动调节系统中设有反馈回路，电流 $I(F)$ 的信号沿这条回路进入。比较运算可表示为

$$I_0 - I = \Delta I \quad (2-3)$$

在 ΔI 达到一定数值时，系统对УУД产生控制作用，以调节电动机的工作。起动完成后，司机直接控制牵引电动机以后的工作。

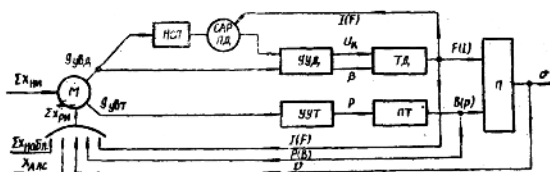


图2-2 属于自动调节系统的列车控制框图

自动控制系统由若干个自动调节系统组成（图2-3），例如调节电动机工作的CAP-ПД、调节制动的CAP-Т和其它等等，它们通过公共的CAУ系统联合起来，使之协调动作。

$$S_{p0} = v_0(I_0 - I_{n1})$$

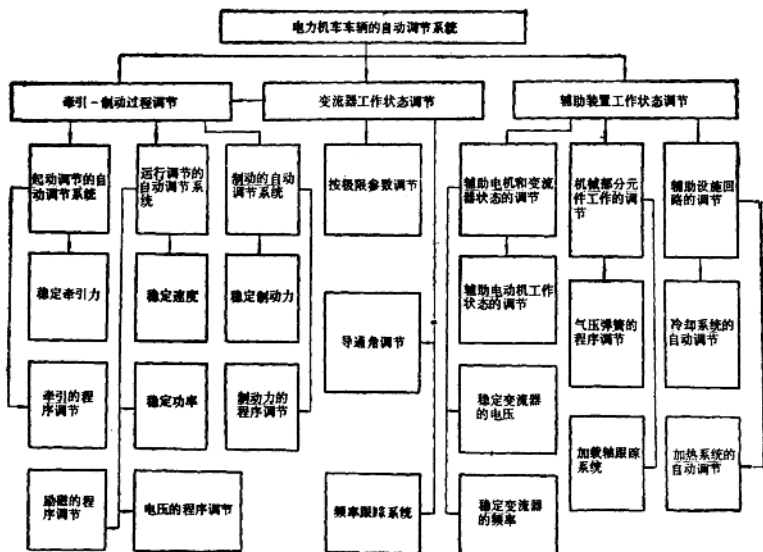


图 2-4 用于各对象系统的自动调节系统

设想机车在运行调节时，只在速度范围 v_p ，(面积 S_p)，譬如是由速度特性所限定的范围内工作，则对于直流机车来说，特性 $v_*(I)$ 相应于电动机在满磁场下工作，而特性 $v_*(I)$ 相应于最深削弱磁场的情况。这种机车的运行调节由牵引电动机的串—并联转换和削弱磁场的方法来保证。此时

$$\kappa_{p,er} = \frac{\sum U_{*i}/U_{*n}}{v_0(I_0 - I_{n1})} \int_{I_{n1}}^{I_0} (v_{0,er} - v_{*i}) dI \quad (2-6)$$

式中 U_{*i} —— m 种连接方式之一的电动机电压；

$v_{0,er}$ 和 v_{*i} —— 在额定电压和相同电流下，相应满磁场和最深削弱磁场时的速度。

对于交流机车

$$\kappa_{p,er} = \frac{1}{v_0(I_0 - I_{n1})} \int_{I_{n1}}^{I_0} v_{0,er} dI \quad (2-7)$$

式中 $v_{0,er}$ —— 电压调节最后级位和最深削弱磁场时的速度。

根据牵引特性 $v(F_*)$ 而不是特性 $v(I)$ ，也可按类似方式决定 $\kappa_{p,er}$ 值。表 2-1 给出了一些直流和交流机车的 $\kappa_{p,er}$ 值。

起动调节性能可以用起动时机车牵引力与粘着力比值，也就是用车起动时粘着力利用系数表示，即

$$\kappa_{ss} = F_s / F_{ss} = \left[\int_0^{v_s} F_{ss}(v) dv \right] / \left[\int_0^{v_s} F_{ss}(v) dv \right] \quad (2-8)$$

式中 F_s ——起动时的平均牵引力；

F_{ss} ——起动速度范围内的平均粘着力。

一般情况下可以取

$$F_{ss}(v) = \Pi A / (B + v) \quad (2-9)$$

式中 Π ——机车动轴上的负载；

A 和 B ——由机车类型决定的常数。

在分级调节时，其调节曲线示于图（2-6），得

$$\kappa_{ss} = v_s / \left[(1 + \kappa_{ss})(B + v_s) \ln \frac{B + v_s}{B} \right] \quad (2-10)$$

式中 κ_{ss} ——起动不均匀系数，表示牵引力由 F_s 到 F_{ss} 范围内的相对摆动值。

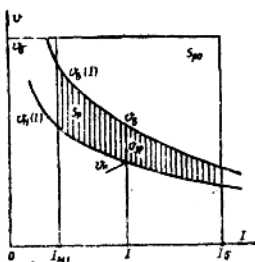


图 2-5 确定运行调节系数的曲线图

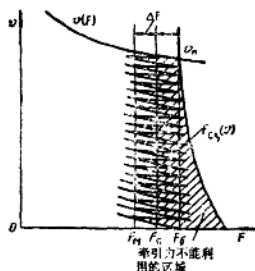


图 2-6 起动调节的估价

表 2-1

直流电力机车型号	κ_{ss}	交流电力机车型号	κ_{ss}
BJ122 M	0.27	BJ180 K	0.69
BJ18	0.485	BJ180 K	0.71
BJ110	0.53	BJ180 A	0.93*

* 估计值

在程序起动调节时，一般取

$$F_s(v) = F_{ss}(v) - \Delta F \quad (2-11)$$

式中 ΔF ——牵引力裕度。

平滑起动时

$$\kappa_{ss} = 1 - \Delta F v_s / [A_s \ln(B + v_s) + B] \quad (2-12)$$

制动时机车的初始调节性能可用类似方式估计。持续坡道上维持速度的再生制动状态，可采用确定 κ_{ss} 的方法；而对各种类型的制动停车，可以采用类似于确定 κ_{ss} 的方法。

辅助机械的调节性能与它们的旋转频率、励磁、电压、电流频率及其它指标的变化范围有关。

由于机车变流装置极不相同，所以它们的调节性能需要逐个按具体情况表示。半导体晶闸管变流器在现代电力机车车辆上获得大力推广，其特点是具有工作状态的宽广调节范围且在某种程度上是无惯性的。

三、电力机车车辆自动调节和自动控制条件的特点

下述因素对电力机车车辆自动控制系统的工作有重要影响。

作用于电力机车车辆上特别是自动控制系统上的高水平扰动。负载变化尤其是货运电力机车负载的颇大变化属于既定的扰动。例如，列车重量 m 可能在 $m_1 \leq m \leq m_2$ 的范围内变化。其中 m_1 ——机车重量； m_2 ——列车最大重量，该范围可达 $(20 \sim 25) m_1$ 。

电压不稳定对调节对象和自动化装置产生强烈影响。机车受电弓上的电压 U 与额定值的差异可能达到 $(0.4 \sim 0.45) U_n$ 的范围，而控制回路中的电压可达 $0.6 U_n$ 的范围， U_n 为该电压的额定值。

温度不稳定也属于扰动。在机车高压室中温度的不均匀性达到 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ ，而各自动化部件的温度波动为 $125 \sim 140^\circ\text{C}$ ，这对所有自动化部件都有明显的影响。这样，由铜导线绕制的继电器线圈的热态电阻比其冷态电阻增大 $1.6 \sim 1.7$ 倍。

对于自动化装置的机电元件以及从动部件如焊接点等不利的影响是振动和附加于静态负载的动态冲击作用力，即

$$P_d = a_d G_{ij} \approx \kappa_d G \quad (2-13)$$

式中 a_d ——动态加速度；

κ_d ——动态系数；

G ——所讨论部分的重量；

g ——重力加速度；

P_d ——动态作用力。

κ_d 值与部件在机车上的位置以及它们的安装方式有关。在最有利的条件下 $\kappa_d > 1$ ，因此不能不注意这种扰动。

在电力机车车辆上电磁干扰相当大，特别是应用晶闸管变流器时更是如此。此时 $\frac{di}{dt}$ 值很大，而集中在高压室有限空间中的大电感和电容乃是宽广频率范围的大型干扰发生器。这些干扰可能在 1m 长导线上引起 600mV 的电压，这样就迫使人们采取专门的防护措施：提高所有信号的功率、使用屏蔽等。

各种系统的运用经验表明，工业应用的一般自动化部件和安装方法，不能保证它们在电力机车车辆上应用的可靠性，电力机车必须采用高性能的自动装置。

电力机车车辆牵引和制动状态的各种最优化原理对于电动车辆的重要性，将在第十章详细讨论。

最充分地利用设备功率的原理 对于电气设备可以表示为一般形式，即

$$\tau_0(T) \rightarrow \kappa_s \tau_s$$

式中 $\tau_0(T)$ ——在所讨论的工作周期 T 中周围介质温度的最大温升；

τ_s ——该类型设备的允许温升；

$\kappa_{i,r} < 1$ —— 温升裕度系数。

从这个观点考虑，电机绕组是一个受限制的部件。即

$$\kappa_{i,r} I_a \leftarrow I_{a,\phi} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2-14)$$

式中 $I_{a,\phi}$ 、 I_a 、 i —— 分别为电流的有效值（均方根值）、额定值和瞬时值，

$\kappa_{i,r} < 1$ —— 电流裕度系数。

当列车达到极限重量时可以应用这个原理，但是当列车重量低于极限值时，这个原理是不适用的。

当实现规定的运行图时能耗最小 此时应满足

$$A_a \leftarrow A = (1/T_a) \int_0^{T_a} U_a i dt \approx (U_a/T_a) \int_0^{T_a} i dt$$

$$T_a = T_{a,r}$$

式中 A 和 A_a —— 实际和最小的能量消耗；

$T_{a,r}$ 和 T_a —— 相应规定和实际的区间运行时间。

这个原理经常使用。

实现区间最大通过能力的原理（最大速度原理）可表示为

$$T_{a,r} \leftarrow T_a = \int_0^L \frac{dl}{v}$$

式中 $T_{a,r}$ —— 区间内的最小运行时间；

L —— 区间长度。

这个原理的方案之一——按给定的恒值运行速度 v_a 调节

$$v_a \rightarrow v_a = \kappa_{v,r} v_a = \text{常数}$$

式中 v_a —— 最大允许速度（机车车辆的结构速度）；

$\kappa_{v,r} < 1$ —— 速度裕度系数。

这个原理也适用于通过能力受限制的线路和高速铁路。

充分利用运行限制原理 在指标允许限值范围内预先选择工作状态作为运行条件。设备部件过载能力的限制即属于此，例如牵引电动机过载能力的限制（图2—7直线1）、粘着方面的限制（曲线2）、电位稳定性方面——整流的限制（曲线3）和极限速度 v_a 的限制（曲线4）。

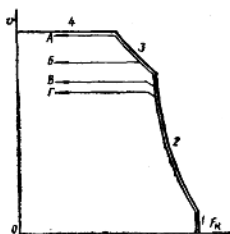


图2—7 电力机车在牵引工作状态的限制

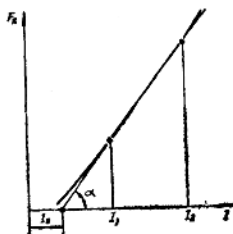


图2—8 牵引力特性分析

当利用这一优化原理时，机车工作相当于细线A。这种最优运行必须强制使用，因此不

经常采用。

组合最佳原理 这是前述一些原理的综合。比如，速度恒定原理或最小能耗原理可与各种不同运行力矩的限值利用原理结合起来。当速度恒定原理与限值利用原理相结合时，机车的工作为细线 E 、 B 、 Γ 。显然，组合最佳原理是最通用的，一般情况下都采用它。

获得列车运行过程中直接调节信号的复杂性（工作信息的信号选择）对列车运行的控制是以调节牵引力 F 和制动力 B 为基础的，但是要得到有关这些指标精确的工作信息是比较复杂的。牵引力或制动力是由各个轮对所实现的相应的力 F_{n1} 和 B_{n1} 形成的，即

$$F = \sum_{i=1}^n F_{ni}, \quad B = \sum_{i=1}^n B_{ni}$$

式中 n ——动轮对数。

通常 $F_{n1} \neq F_{n2} \neq F_{n3}$ ，但测量它们有不少技术上的困难。譬如，为了得到 F 值的信息，就不得不寻找牵引过程的间接指标 x ，则有关信息不难得到。此时必须近似保持以下相似条件

$$x \approx a + mF \quad \frac{dx}{dt} \approx c \frac{dF}{dt} \quad \dots \frac{d^n x}{dt^n} \approx c \frac{d^n F}{dt^n}$$

式中 m ——比例常数；

a ——常数，可以是正值，也可以是负值。

分析表明，即便利用自动车钩牵引力的 F_c 值代替 F 信号，实现这些条件也是困难的。由于机车和列车运行阻力与速度关系特性不同，所以不仅技术方面有困难，而且原理分析上也有困难。

提供牵引力间接信息的另一个指标是牵引电动机的电流 I ，牵引力和电流有以下关系

$$F_c = \kappa_i I \Phi(I) - \Delta F \quad (2-15)$$

式中 κ_i ——计及牵引传动装置的电机常数；

$\Phi(I)$ ——与电流 I 有关的磁通；

ΔF ——电动机和牵引传动装置的牵引力损失。

虽然式(2-15)是非线性的，但在电动机磁路系统饱和的大负荷区域中（图2-3）可认为

$$F_c = \frac{1}{C} (I - I_0)^2 \quad (2-16)$$

式中 C ——角系数

$$C = \text{ctg} \alpha \approx \frac{d(I - I_0)}{dF_c} \quad (2-17)$$

量 C 仅在 $I_1 \leq I < I_2$ 范围内是常数，这相当于起动调节区域。在这个电流范围以外，用 I 代替信号 F 将有较大误差，并要求不断进行修正。

各台牵引电动机的电流可能有明显不同。所以，通常在牵引电动机 $T\Pi 1 \sim T\Pi 4$ （图2-9a）的电流传感器回路中接入简单的逻辑装置（部件），来自动选择相应于最大电流值 I_1 的信号。逻辑装置 $\Pi \mathcal{Y}$ 由二极管 $\Pi_1 \sim \Pi_4$ 组成，它从信号——电压 $u(I_1) \sim u(I_4)$ 中选出最大的 $u(I_1)$ ，并把它作为工作信息，加到自动调节系统CAP中去。

同样可获得运行速度 v 的信号（图2-9b）。在这里与动轮对 $K1$ 、 $K2$ 相连接的测速发电机 $T\Gamma 1$ 和 $T\Gamma 2$ 产生的电压 $u(v_1)$ 和 $u(v_2)$ 是轮对旋转频率 n_{s1} 、 n_{s2} 的信号。为使轮箍直径