

119399

电气机械的自动控制系统

苏联 Т.Н.索柯洛夫著

教师参考室

陈列图书不得携出室外

电力工业出版社

电气机械的自动控制系统

苏联 T. H. 索柯洛夫著

陈 敦 錫译

电 力 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書敘述电动机自动控制系统理論基础，研究各种自动电气傳动线路構成的实例，給出这些线路中基本参数的計算方法。

本書供工程师和研究自动控制問題的科学工作者之用，也可作为动力和电工院系学生的参考書。

Т. Н. СОКОЛОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД 1952

电气机械的自动控制系统

根据苏联国立动力出版社1952年列宁格勒版翻譯

陈 敦 錫譯

568 D 209

电力工業出版社出版 北京市东大街26号

北京市書刊出版登記證出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

*

780×1092¹/₂开本 * 8号印張 * 182千字 * 定价(第10类)1.20元

1957年5月北京第1版

1957年5月北京第1次印刷(0001—5,600册)

序 言

自动装置和遙远机构的广泛利用，与各种自动控制和調整系統的發展有着不可分离的关系。属于这类系統的，首先是用以控制各种机构和联合机构的电气机械系統。

本書系以作者在列宁格勒加里宁工学院給电气机械系自动技术和运动技术专业学生們的講課提綱为基础的。在該課中主要注意研究系統元件和工程計算方法，这些都是在做实际設計时必会遇到的。

在本書第一部分，詳細地敘述了具有电机放大器和各种反饋組合的連續控制系統的理論。第二部分則全部用来研究电气机械的随动系統及其計算和分析的方法。在这部分中，根据給定的过渡历程素質的准則，敘述了作者所提出之綫性随动系統的分析計算方法，并考虑了若干分析非綫性系統的模拟方法的应用問題。

可惜限于本書篇幅，不可能把書中所有涉及到的問題都闡述得很充分，特別是对週率分析法的敘述。誠然，讀者若能瀏覽一下“电”雜誌和苏联科学院許多雜誌中所刊載的、苏联学者們的作品，便很容易弥补这个缺陷。毫無疑义，在第一次企圖概括任何領域中所积累的經驗时，还会具有其他不可避免的缺点。

所有批評和意見請投函下列地址：列宁格勒涅瓦大街28号苏联国立动力出版社列宁格勒分社。

作者認為有义务对評閱者H. B. 哥罗霍夫教授和校閱者Ю. A. 薩比宁講師能仔細地审閱本書和就本書內容提出的許多宝貴批評表示感謝。

作者

目 录

序 言

第一章 自动控制的結構回路和元件	4
§ 1. 自动控制的結構回路	4
§ 2. 自动控制回路構成的基本原理	6
§ 3. 自动控制系統的反饋和并联回路	9
第二章 执行环节(电动机)	11
§ 4. 概述	11
§ 5. 他激直流电动机	14
§ 6. 他激电动机的过渡特性	17
§ 7. 他激电动机当激磁电流变化时的过渡特性	24
§ 8. 双相鼠籠型感应电动机的特性	26
第三章 应用于自动控制綫路中的放大器	30
§ 9. 可能的結構形式	30
§ 10. 电机放大器(ЭМУ)	31
§ 11. 他激电机放大器	32
§ 12. 复激电机放大器	45
§ 13. 具有正交磁場的电机放大器	52
§ 14. 磁放大器	56
§ 15. 电子-离子放大器	64
§ 16. 电气机械式繼电器-接触器放大器	71
第四章 自动控制綫路中的計算裝置	76
§ 17. 計算裝置的用途及其可能的結構形式	76
§ 18. 电压的代数相加	77
§ 19. 电流的代数相加	79
§ 20. 机械量的相加	82
§ 21. 电气机械的相乘	85
§ 22. 函数計算裝置	88
§ 23. 电气式和机械式的微分和积分裝置	94

第五章 自动控制系统的质量标志	105
§ 24 对自动控制系统所提出的技术要求	105
§ 25 控制系统输入函数的可能形式	106
§ 26 自动控制系统的过渡特性	108
§ 27 过渡状态的准则	116
§ 28 稳定状态的准则	124
§ 29 自动控制系统的速率特性	127
第六章 随动自动控制系统的综合法	133
§ 30 具有无惯性放大器的最简单系统	133
§ 31 具有惯性放大器的最简单系统	142
§ 32 具有与偏差的一次导数成比例的信号分量的线路	146
§ 33 具有加速度反馈的系统	152
§ 34 具有积分和微分预加环节的系统	166
§ 35 电压、电流和对电压的导数的反馈	178
第七章 特性的非线性对所设计系统过渡状态影响的分析	193
§ 36 当输入函数为突波形式时的过渡特性	193
§ 37 随动装置特性的非线性和放大器输入串级饱和的影响	195
§ 38 运动环路的间隙对过渡历程特征的影响	201
§ 39 饱和和运动环路的间隙对具有积分环节的系统过渡历程的影响	203
第八章 非线性随动系统的模拟	209
§ 40 执行电动机的模拟	209
§ 41 最简单随动系统的等效线路	213
§ 42 随动系统环节的比拟元件	216
§ 43 放大装置的模拟	219
§ 44 执行机构的模拟	221
§ 45 电动机负荷转矩的模拟	222
§ 46 运动环路间隙的模拟	224
§ 47 随动装置的模拟	225
§ 48 模拟元件的组合及其对于设计随动系统的意义	226

第一章 自动控制的結構回路和元件

§ 1. 自动控制的結構回路

任何工艺过程的自动化，基于按照检测着若干输出参数的测量仪器的指示，改变输入控制对象的能量；能量的数值，在控制的过程中是应该起变化的。因此，控制过程的素质，首先决定于检测回路中测量仪器的准确性和快速作用。按照自动化过程的特征及控制系统的作用原理，检测上述过程的仪器，可以是各式各样的。自然，在电气机械自动控制的场合，这些仪器必须将各种非电气的量改变为电动势、电流等的作用。类似此种装置的理论及计算，形成测量技术的特殊领域，已远远超出了本书的范围。在电气机械的控制系统中，任何由控制系统执行电动机传动的机构，都是控制对象。因此，执行机构和电动机的角位移或线位移以及速度即是输出参数。借助于不复杂的变换装置，便可把这些机械的参数改变为电气的，电气参数能以检测仪器来量度，或者直接被引到控制系统中。根据量度结果利用的特征，可归纳为三种基本的控制形式：

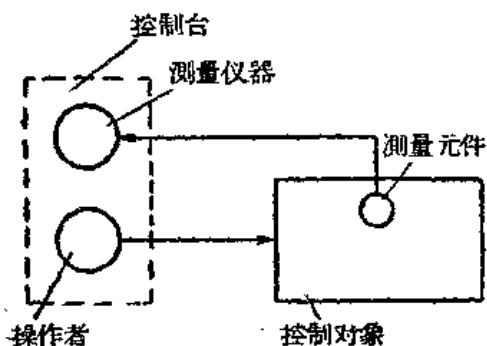


圖 1 控制对象直接控制的系統圖

- 1) 直接的;
- 2) 遥远的(放大的);
- 3) 自动的。

在第一种情况下(圖 1)，操作者根据测量仪器的指示，直接作用到控制机构。这时控制台須設置在控制对象的最近旁。控制的素质和工艺过程的全部过程，在此种情况下

完全决定于操作者的技巧。

第二种控制方案的系統圖表示于圖 2。这种控制形式的特征在于在控制的回路中应用了放大器。操作者把指揮脉冲供給放大器的輸入端，而控制機構的位移則由靠放大器供电的控制电动机产生。如果在这样裝置的檢測回路中，准备了檢測参数的遙远測量，則控制台可以离开控制对象任何距离。

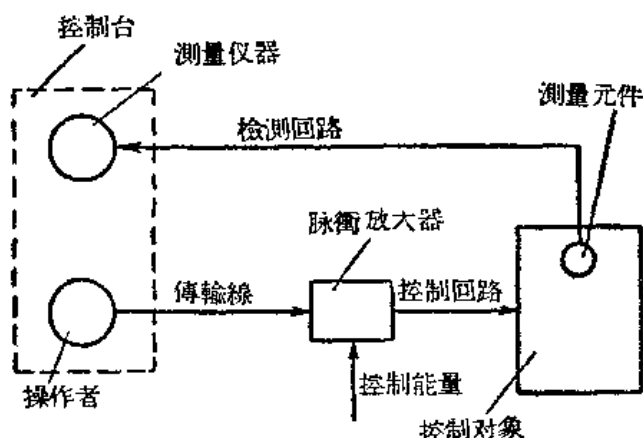


圖 2 控制对象遙远控制的系統圖

表示于圖 3 的自动控制系统圖，与前一圖的区别在于具有代替操作者的計算裝置。該計算裝置使得来自被控制对象的檢測脉冲和来自指定所期望过程的控制裝置的控制脉冲相比較。操作者在这种情况下之作用，在于預先調節控制裝置。

比較上述的控制方法表明：在所有三种情況下，控制回路均形成由一系列互相串联的环节所組成的閉环回路。仅仅在前面两种情況下，其主觀素質無法估計的操作者形成閉合环节；而在后一种裝置中則是以計算裝置代替人。

同时必須指出：在实际的綫路中，除了表示于圖 3 的基本控制回路外，还具有形成一系列內部閉环系統的輔助檢測和鎮定联系。因此，近代的自动控制綫路，通常乃是多次閉环系統。在控制时，在类似的系統中，發生最复杂的、以高阶微分方程式描述的物理过程。

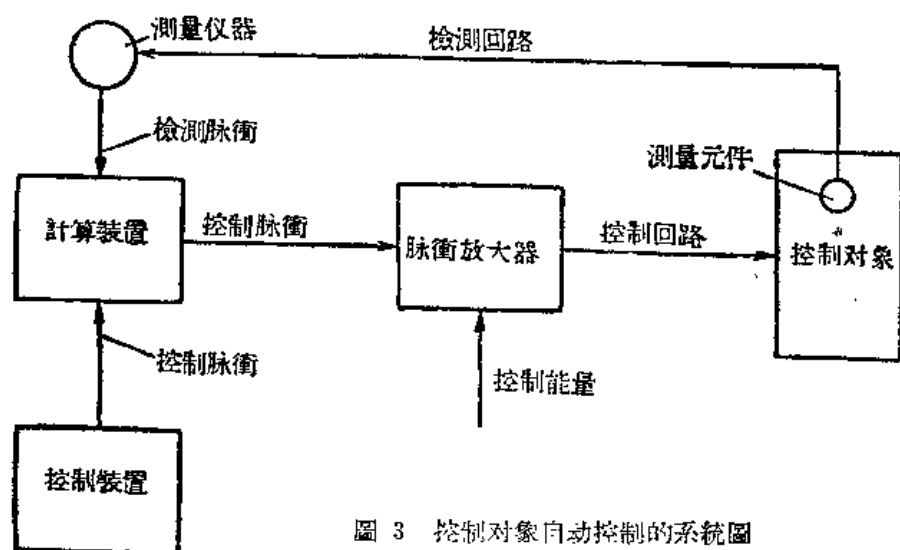


圖 3 控制对象自动控制的系統圖

§ 2. 自动控制回路構成的基本原理

a) 可能的控制原理 按照自动化工艺过程的特点，它們的控制可以是間断的(脉冲的)或連續的。在第一种情况下，控制对象参数的测量和控制脉冲的傳送，間或經過若干時間間隔，而在脉冲之間要进行休息；控制系統的行为，唯一决定于内部的慣力和外部的扰动力。在第二种情况下，控制对象参数的测量和控制系統的作用，在整个工艺过程的过程中，是連續地进行的。

从控制方案中选择其一，乃是控制系統設計的第一阶段。

6) 控制回路环节的結構特点 間断或連續控制的选择，首先影响到控制回路环节的結構。控制回路任何环节的任务，乃是把加于环节輸入端之某一輸入量 U_{ex} 变换成为和它有关的輸出量 U_{out} 。因此，环节的結構可用以下的关系表达之：

$$U_{out} = f(U_{ex}).$$

基本控制回路环节的类型，按照用途区分如下：

- 1) 执行的(动力的)；
- 2) 放大的；
- 3) 計算的；

4) 控制的;

5) 测量的。

在个别情况下, 把几个环节的作用归併起来就可以减少基本回路环节的数目。如果在环节中輸入量的变化不与克服内部的慣力相联系, 則这样的环节称为無慣性的。对于無慣性环节, 輸入量和輸出量之間的关系可用代数方程式表示之:

$$U_{abx} = kU_{ax}.$$

但是大多数应用于实际綫路中的环节均具有若干慣性。因此, 上述代数方程式只是在稳定状态时才成立, 那时輸入量和輸出量經常保持不变的值。在过渡历程中, 当 U_{ax} 为变数时, 慣性环节的行为可用微分方程式表示。微分方程式的阶数, 由該环节中可能的能量儲积形态决定。

如果联系着輸入和輸出量的方程式的系数, 于輸入量 U_{ax} 可能变化的整个範圍內始終为一常数, 則这样的环节称为綫性的。如这个条件不成立时, 环节便变成为非綫性的。

严格地說, 在自然界絕对的綫性环节是没有的, 只是当輸入量的变化在某一有限区域的範圍內, 我們才能談到綫性。

在自动控制及調整的技术中, 以下列一阶微分方程式描述的慣性环节得到了最广泛的应用

$$T \frac{d\Delta U_{abx}}{dt} + \Delta U_{abx} = k\Delta U_{ax}, \quad (1)$$

式中 T ——环节的慣性常数, 具有時間因次, 它决定着过渡历程的速度。

当輸入量的变化为突波形式时, 方程式(1)的解具有形式:

$$\Delta U_{abx} = k\Delta U_{ax}(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (2)$$

此函数的曲綫表示于圖 4。今后对于复杂自动控制系統的分析, 我們通常將利用运算子轉換的方法。这个方法的实質, 在于把某一自变数 t 的函数 $F(t)$ 轉換为自变数 p 的新函数 $F(p)$ 。同时在一般的情况下 p 是复数, 并称之为运算子。如所週知, 函数

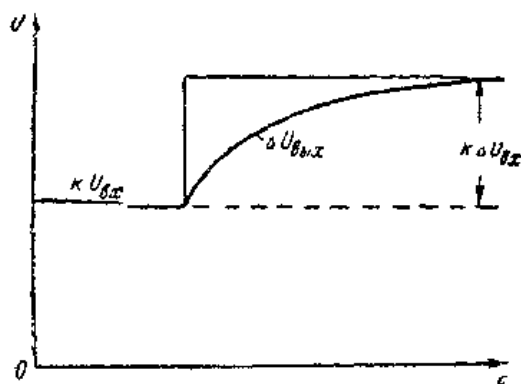


圖 4 在慣性环节中，当輸入扰动为突波形式时輸出量的变化曲线
 $F(t)$ 的运算子式 $F(p)$ 可以利用拉普拉斯轉換求得之：

$$F(p) = \int_0^{\infty} F(t) e^{-pt} dt.$$

在工程的实践中，常常利用几个以其他运算子書写的形式，这在起始条件为零时特别方便。在这个情况下，用替代的方法把轉換为运算子書写的形式：

$$\frac{d}{dt} \doteq p; \quad \frac{d^2}{dt^2} \doteq p^2; \dots; \frac{d^n}{dt^n} \doteq p^n,$$

最后，
$$\int dt \doteq \frac{1}{p}.$$

当起始条件不为零时，导数的运算子式在一般的情况下，可写成这样：

$$\frac{d^n F(t)}{dt^n} \doteq p^n F(p) - p^{n-1} F(0) - p^{n-2} F'(0) - \dots - p F^{(n-2)}(0),$$

式中 $F(0), \dots, F^{(n-1)}(0)$ ——函数及其导数的起始值。

于起始条件为零时，方程式(1)被写成运算子式时具有形式：

$$(1 + Tp) \Delta U_{BX} = k \Delta U_{BX} \quad (3)$$

或
$$D(p) \Delta U_{BX} = k \Delta U_{BX},$$

式中 $D(p) = (1 + Tp)$ ——慣性环节之运算子。

比例
$$k(p) = \frac{k}{D(p)} = \frac{k}{1 + Tp}$$

我們称之为环节的傳輸函数。环节傳輸函数的确定，是分析自动控制系统的基本任务之一。

为了从运算子式反轉換为时间的函数，我們將利用分解公式的办法。在起始条件为零时，此公式得到这样的形式，如果

$$\frac{H(p)}{F(p)} \doteq F(t),$$

$$\text{則} \quad F(t) = \frac{H(0)}{F(0)} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H(p_i)}{p_i F'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (4)$$

式中 $p_1, \dots, p_n$ ——方程式 $F(p)=0$ 的根。同时必須使得多項式 $F(p)$ 的乘幂不小于 $H(p)$ 之乘幂，并且多項式 $F(p)$ 的中根不是重根。

对上述慣性环节之傳輸函数的运算子式应用分解公式，可得：

$$H(p)=k; \quad F(p)=1+Tp; \quad F'(p)=T; \quad p_1=-\frac{1}{T};$$

$$\frac{H(0)}{F(0)}=k; \quad k(t)=k(1-e^{-\frac{t}{T}}).$$

在解高阶微分方程式时，应用分解公式特別方便，因为可避免在积分时寻求許多任意常数的必要性。

上述方法的优点，也在于简化了中間的計算，因为微分和积分的运算，在轉換为运算子式时，适合以运算子乘除。

运算子法的优点，在分析由一系列串联环节所組成的、自动控制的复杂回路时，特別明显。在这些情况下，各环节小鏈的合成傳輸函数的运算子式，可以表式为各个环节之傳輸函数乘积的形式。

§ 3. 自动控制系统反饋和并联回路

在基本的控制回路內，还可以有由几个反饋回路構成的閉环回路。在該回路中，輸出环节能量的一部分，反过来供給前面任一环节的輸入端。反饋回路可以包括控制回路的一部分，其中包

含一个或几个基本回路的环节。反馈回路亦可包含类似于基本回路之环节的环节。如果这个环节是直线的，被它所传输的量仅仅在数值上起变化，则这样的反馈回路称为刚性的。

具有刚性反馈的放大环节的最简单系统图表示于图 5。

如果反馈电压

$$e_0 = -\frac{r_{01}}{r_{01} + r_{02}} e_y$$

在符号上与信号电压 e_c 相反，则这样的联系称为负的。放大器中的负反馈，会降低所包括区域的放大系数，但同时可减小系统的惯性和负荷的波动对放大器工作的影响。如果反馈电压在符号上

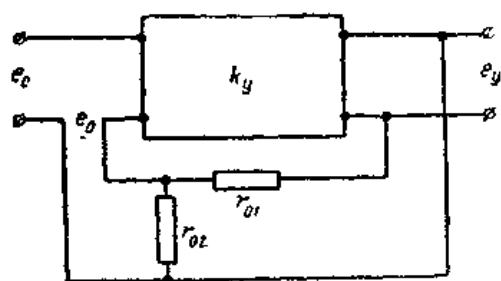


图 5 具有刚性反馈的放大环节的系统图

与信号电压一致，则这样的联系称为正的。正反馈可增大所包括区域的放大系数，并且理论上可以达到无穷大。但是过强的正反馈，会降低调整系统的稳定性，以及能引起非衰减振荡

的出现。

除了刚性联系以外，在现代的系统中，通常还采用特种的防振(韧性)联系。在这些情况下，在反馈的回路中接一使输出量改变为其对时间的导数的微分环节。这样形式的联系，通常多系负的，可防止在闭环回路中发生振荡。

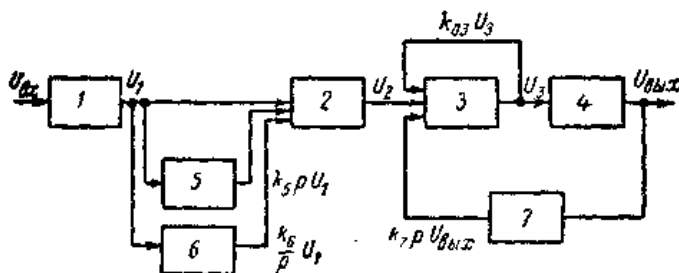


图 6 复杂的连续控制系统的骨架图

防振联系会減緩控制系統的作用和增大其动态誤差。因此它不宜过强。

在現代高級的自动控制系统中，多半采取由几个反饋和計算环节的組合形式。复杂的連續控制系統的例子表示于圖 6。

应用微分(5)和积分(6)計算环节，对于控制的素質具有特殊的意义。

微分环节能够引入后一环节，除了傳輸量本身以外，还有一个它对時間的导数的量。因此控制機構的位移能获得一定的超前，从而当給定状态急剧变化时，可提高控制的准确性。引入控制回路的积分环节，由于其所固有的、与控制誤差成比例的信号累积的特性，在稳定的状态下(当控制機構位移的速度为恒定时)，能使誤差減小到零。在控制的过程中沒有急剧振盪的情况下，应用积分环节特別有效。

第二章 执行环节(电动机)

§ 4. 概 述

自动控制系统的设计，从选择移动控制機構之执行环节(电动机)或檢測着工艺过程之过程的測量裝置着手。这些元件的选择完全决定于控制对象的特征，与控制回路之中間环节的结构无关。我們从执行电动机来开始研究控制元件，是因为电动机型式的选择在頗大的程度內决定着中間环节的结构。

在电气机械的控制系統中，用来作为执行电动机的有：

- 1)他激直流电动机；
- 2)串激直流电动机；
- 3)双相及三相鼠籠型感应电动机；
- 4)同步或反应式电动机。

在小功率的控制系統中，主要采用双相感应式和反应式电动

机；而中等或較大功率的系統，通常則采用他激直流电动机。因此值得特別注意的乃是他激直流电动机。

各种型式电动机結構特点的詳細研究，不是本書的任务；因此，我們只討論到电动机的特性。为了設計和分析电气机械的自动控制系统，这些知識是必需的。

电动机的这些特性，仅限于以上所列举之控制回路环节的特性。

电动机的傳翰函数，在穩定的状态下，决定于当負荷不变时給出角速度与信号之間关系的、以及当控制信号的值恒定时給出角速度与电动机負荷变化关系的調整和机械特性。速度能根据工艺过程的过程任意地变化，对于大多数的自动裝置具有很大的意义。速度的改变可借機構运动环联中的机械轉換，或直接改变执行电动机的速度来实现。在这些情况下，調整特性对电动机型式的選擇發生重大的影响；因为把速度的改变轉移給电动机，可使裝置机組的結構簡化，和通常会給予按照另一种形式構成全部工艺过程的可能性。例如，用电气或水力来改变金屬切削机床的速度时，可不必应用特殊的变速箱，并能保證較准确的選擇切削速度。最后，在某些情况下，电动机速度的变化必須預先遵循給定的規則。生产機構的和所謂最大与最小速度之比的調整範圍的要求，同样是各式各样的。在某些情况下，所必需的調整範圍增加到 100 或更大。当調整範圍較大时，电动机的給定和实际速度相应的檢測，具有特殊的意义。按照电动机的型式和控制綫路，速度的調整可以是間斷的(脉冲的)或連續的(平滑的)。速度的間斷調整，通常是借轉換控制綫路中各个回路的方法来实现的，而連續的調整，則用改变該綫路中任一参数的方法来实现，例如改变調整变阻器的电阻。在現代的實踐中，在重要的情况下，采取最复杂的、具有电机和电子-离子放大器的連續調整系統。这些將在以后各章中注意研究。

自动裝置工作的穩定状态，决定于电动机的角速和轉矩。这两个量之間的关系： $\omega = f(M_{ae})$ 称为机械特性。此关系之特征，

可以是各式各样的，它决定于电动机的結構和控制綫路的参数。

机械特性素質的基本标志为其刚性。当电动机的轉矩从零变化到額定值(說明書所規定的)时，速度的相对变化称为机械特性的刚性：

$$s_{HOM} \% = \frac{\omega_0 - \omega_{HOM}}{\omega_0} 100\%.$$

特性的刚性有时称为电动机的滑率。

不同的工作机构，要求不同的傳动电动机特性的刚性。因此，在选择电动机的型式时，就必须注意到电动机的机械特性及其改变的方法。

例如起重运输的机构，要求电动机有韧性特性与較低的速度，因为这些裝置的电动机，必须保证在起动和制动时机构的平稳运行和無剧烈的速度波动。相反地，大多数金屬切削机床的机构，要求电动机的刚性特性，以保证切削截面与速度無关。

最后，某些机构，例如冶金用的剪床，要求在其生产过程的过程中改变机械特性的形状。所有以上所談到的机械特性，是电动机运用素質的重要标志之一。

电动机的傳輸函数，决定于机械的和电磁过渡历程的特征。在調整的过程中，速度的每一变化或負荷的改变，都会發生机械的过渡历程。机械过渡历程的持續性，与电动机的轉矩及电动机和执行机构总和的慣性力矩的比值关系有关。电磁过渡状态是当电动机繞組中的电流發生变化时，由于电动机繞組的电感所引起的。在电樞繞組中，电磁过渡历程对电动机工作的影响比較机械过渡历程要小，因此在大多数的情况下可以略去不計。因为在自动化裝置的自动控制过程中，执行电动机的速度是不断在变化的，因此电动机傳輸函数的性質，对控制的动态准确性有很大的影响。它同时也是在控制系統中出現振盪的基本原因。由于現代自动化工艺过程速度的不断提高，因此电动机的动态特性具有特殊的意义。

§ 5. 他激直流电动机

他激直流电动机在功率自 0.1 瓩及以上的自动控制系统中，得到了最广泛的应用。仅在功率只有几瓦时，它才由较可靠的鼠笼型感应电动机所代替。他激电动机优良的调整特性，在速度的调整范围要求很宽广的情况下，已成为完全不可缺少者。

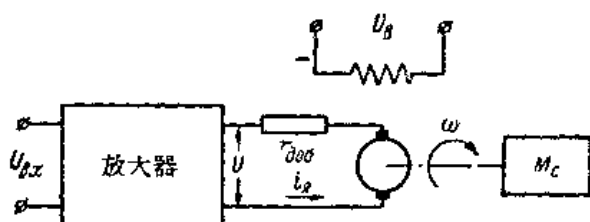


圖 7 他激直流电动机的联结线路

这样电动机的最简单联结线路表示于圖 7。在稳定的状态下，网路电压为电动机的反电动势和电枢绕组的电压降所平衡。同时电动机所发出之转矩为负荷转矩所平衡。

电动机的反电动势

$$e_{\partial\theta} = c_{e\theta} \Phi(\omega),$$

式中 Φ ——激磁的作用磁通，馬克斯威尔；

ω ——旋轉的角速度，1/秒；

$c_{e\theta}$ ——結構常数，伏·秒/馬克斯威尔。

当激磁电流的值为恒定时，作用磁通仅因为电枢反应的影响才可以改变。因为这个影响在大多数的情况下不大，那末可以認為

$$e_{\partial\theta} = c_e \omega, \quad (5)$$

式中 c_e ——新的結構常数，伏·秒。

电动机的电磁转矩，瓦·秒，

$$M_{\partial\theta} = \frac{P_{\partial\theta}}{\omega}. \quad (6)$$

在这里， $P_{\partial\theta} = e_{\partial\theta} i_a$ ——电磁功率。