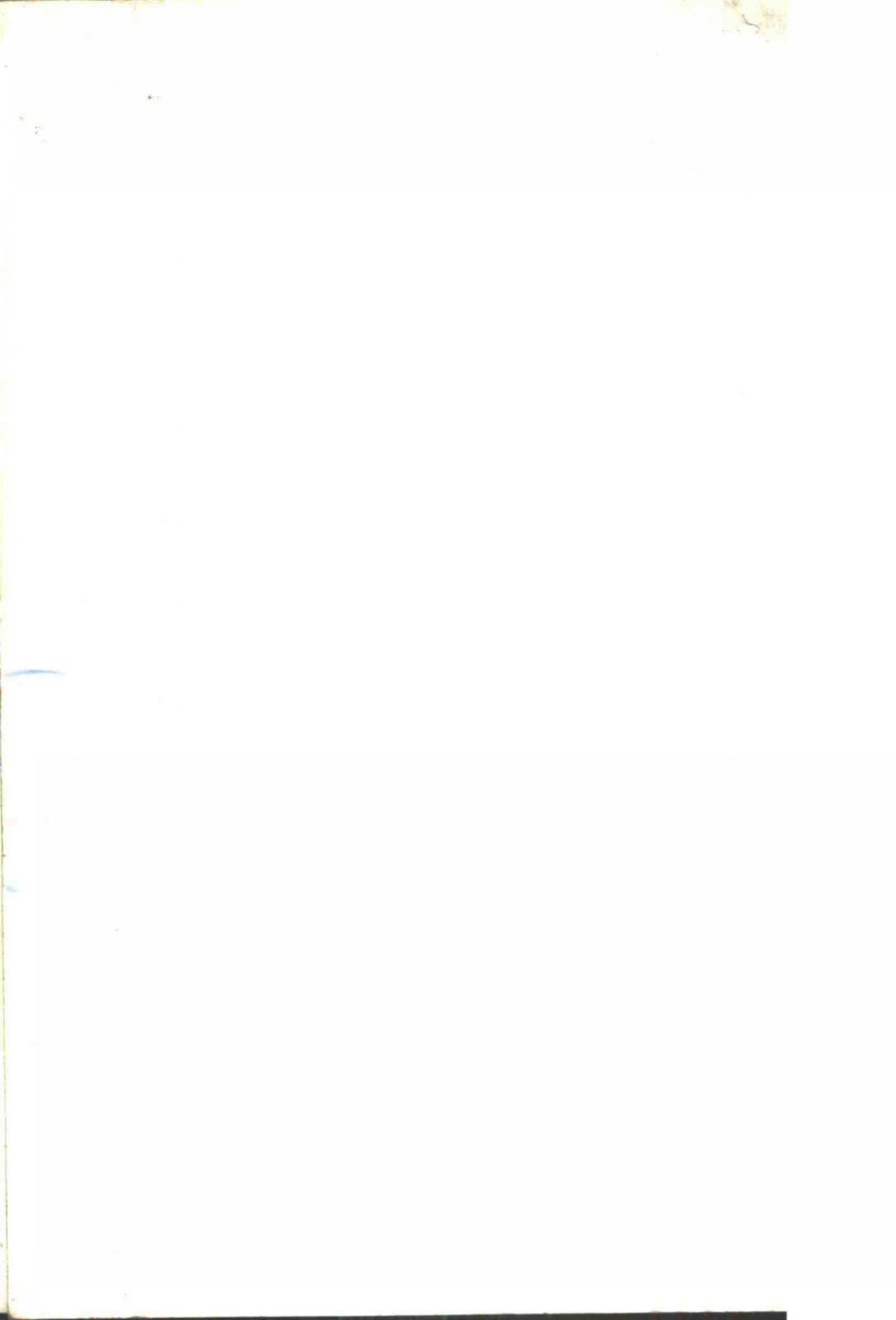


电磁铁优化设计

[苏] A.Γ 尼基钦科著

沈阳机电学院
科技情报研究室

1982年1月



电磁铁优化设计

任耀先等译

沈阳机电学院
科技情报研究室

译者的话

电磁铁是自动化装置和系统中应用极为广泛的自动化元件，同时它又是许多自动电磁元件（例如接触器，继电器等）的基本构成部分。关于电磁铁的理论分析和设计方法是电器工作者普遍关心和感兴趣的问题。长期以来，电磁铁的设计主要是凭借经验和类比的方法进行结构方案的选择，然后再进行特性验算。自从五十年代以来，由于电子计算机和计算技术的迅速发展，使得工程技术人员能够从繁杂冗长的计算工作中解放出来，而且有可能比较准确地处理在电磁铁计算中所遇到的分布参数与非线性参数问题。数学工作者在数学方法方面丰富和发展了运筹学、规划论等数学分支的内容，为优化设计提供愈来愈多的最优化算法，给优化设计提供了强有力的手段和数学基础，使得电磁铁优化设计的研究工作在七十年代得到了非常迅速的发展。

“电磁铁优化设计”这本书的主要内容有：根据给定的技术条件，在满足优化准则（体积、重量、费用、功率最小等）前提下，电磁铁的设计方法；在给定的静态特性和动态特性的基础上，用非线性规划的方法进行电磁铁设计；研究和讨论具有最小动作时间的直流电磁铁的几何关系选择问题；介绍数字计算机和模拟计算机的程序框图与计算例题，并在附录中给出了螺管式和拍合式两种最常用的典型电磁铁的优化设计的数据表，可供工程技术人员进行优化设计时查寻。

目前，我国不少单位开展了优化设计的研究工作，并取得了可喜的成果和经验。但由于优化设计涉及到数学问题，计算技术和工程实践等多方面的问题，特别是为了满足工程需要，将这几个方面的问题紧密结合起来，有效地解决实际问题，这个任务还是

很艰巨的，研究工作也将是长期的。只要我们勇于实践，不断总结经验，认真吸取国外先进技术，我们就能够逐步发展和完善电磁铁优化设计的理论和方法。

本书由沈阳机电学院电器教研室任耀先（一章）、张金城（二、四章）、苑文叔（三章）、贾继君（五章）和厉焕璞（六章）等同志翻译，全书由任耀先同志审校。袁玉芹同志为本书的出版做了许多工作在此表示感谢。

译者

目 录

译者的话

第一章 优化设计一般问题	1
1. 优化准则.....	1
2. 电磁铁最优几何关系的分析.....	3
3. 用几何尺寸表示电磁铁的特性.....	15
第二章 电磁铁优化设计任务的提出	25
4. 任务的数学模型.....	25
5. 最优化方法的特征.....	26
6. 非线性规划法.....	30
第三章 带挡铁的螺管式电磁铁的优化设计	35
7. 问题的提出.....	35
8. 计算结果的分析.....	41
9. 螺管式电磁铁优化设计程序.....	49
第四章 拍合式电磁铁的优化设计	55
10. 任务的提出和结果的分析.....	55
第五章 根据给定的动特性设计电磁铁	66
11. 任务的提出.....	66
12. 用数字计算机确定 $T = f(x)$ 关系.....	69
13. 用模拟计算机确定 $T = f(x)$ 关系.....	72
14. 满足给定的动特性的电磁铁最优参数的计算.....	76
15. 电磁铁设计的简化方法.....	80
16. 电磁式电器的设计.....	84
第六章 电磁铁几何关系对时间特性的影响	91
17. 触动时间研究课题的提出.....	91

18. 研究结果的分析.....	96
19. 电磁铁几何关系对其运动时间的影响.....	102
20. 电磁铁开断时考虑涡流影响的动态计算.....	108
附录	117
文献目录	134

第一章 优化设计一般问题

1. 优化准则

首先必须明确，什么样的电磁铁结构认为是最优的。在设计时，通常给定的技术条件有：线圈电压 U ，周围温度 $\theta_{\text{окр}}$ ，工作制。还需给定，在一定工作气隙 δ_0 下的吸力 F ，或者给定吸力特性，也就是从初始气隙 δ_0 到终端气隙 δ_x 的变化范围内的一些吸力值。按照上述的原始数据，可以设计出具有各种不同技术和经济指标（重量、体积、能量损耗和费用等）的电磁铁。显然，在这些方案中有个最优方案，它既能保证给定的电磁吸力（或给定的吸力特性），又能满足给定的最优准则。

在设计电磁铁时典型的最优准则有：

最小体积，可以利用线圈和导磁体材料的总体积作为极值指标，

$$\text{即 } V_r = V_{\text{обм}} + V_{\text{ст}} \quad (1)$$

最小重量，线圈重量等于它的体积 $V_{\text{обм}}$ 乘以线圈的填充系数 $k_{\text{з.обм}}$ 和导线材料的比重 γ_{np} ：

$$m_{\text{обм}} = k_{\text{з.обм}} \cdot V_{\text{обм}} \gamma_{\text{np}}$$

导磁体的重量等于它的体积 $V_{\text{ст}}$ 乘以材料的比重 $\gamma_{\text{ст}}$ 和叠片系数 $k_{\text{з.ст}}$ （对于叠片导磁体）：

$$m_{\text{ст}} = K_{\text{з.ст}} \cdot V_{\text{ст}} \cdot \gamma_{\text{ст}}$$

导磁体材料的总重量为

$$m = m_{\text{обм}} + m_{\text{ст}} \quad (2)$$

线圈导线材料的最小消耗。线圈导线消耗的材料 V_{np} 等于线圈的体积乘以它的填充系数 $K_{\text{з.обм}}$ ：

$$V_{\text{np}} = K_{\text{з.обм}} \cdot V_{\text{обм}}$$

材料的最小费用，材料的最小费用决定于材料的重量乘上单位材料的价格。

$$C = m_{\text{обм}} \Pi_{\text{нр}} + m_{\text{ср}} \cdot \Pi_{\text{ср}} \quad (3)$$

长期工作时最小功率损耗，它等于

$$p = j^2 \rho_{\tau} K_{\text{э.обм}} V_{\text{обм}} \quad (4)$$

电流密度 j 可以通过电磁铁的几何尺寸，线圈的允许温升和有效材料的物理特性来表示。若把这些量作为自变量给出后，则功率可以用磁系统几何尺寸的函数来表示：

$$p = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

最大静态吸力。如果忽略导磁体钢的磁阻，则吸力可按下面公式确定：

$$F = \frac{(IW)^2}{2} \cdot \frac{dG_{\text{нр}}}{d\delta} \quad (5)$$

式中 IW —线圈磁势的稳态值； $G_{\text{нр}}$ —按磁链归算的磁系统磁导。

可以用导磁体尺寸，温升和材料的特性表示 IW 和 $G_{\text{нр}}$ 值。因此，吸力可以写成：

$$F = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

电磁铁接通时触动时间最小。从接通线圈电路瞬间起到衔铁开始运动止的这段时间称为触动时间。对于不饱和的直流电磁铁的磁系统，触动时间可以按下式确定：

$$t'_{\tau_0} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{(iW)_{\tau_0}}{IW}} \quad (6)$$

式中 T —线圈的时间常数； $(iW)_{\tau_0}$ —触动安匝。

时间常数 T 可以表示为导磁体和线圈几何尺寸的函数。从式 (5) 可以得出：

$$(iW)_{\tau_0} = \sqrt{\frac{2F_{\tau_0}}{dG_{\text{нр}}}} \Big|_{\delta = \delta_0} \quad (7)$$

式中 F_{TP} —触动吸力。

将 $dG_{\text{TP}}/d\delta$ 用磁系统尺寸来表示，则触动时间可以写成如下形式：

$$t'_{\text{TP}} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

根据具体条件还可以突出电磁铁的其它一些特性作为最优准则。

2. 电磁铁最优几何关系的分析

对于电磁铁的尺寸和工作能力起决定性影响的基本的几何参数是电磁铁的铁芯直径，线圈高度和外径，以及工作气隙。这些尺寸基本上决定吸力，线圈发热和电感。取这些尺寸作为主要的。此外，电磁铁的指标还与拍合式电磁铁的壳体尺寸极帽直径和高度，吸入式电磁铁的挡铁和铁芯的形式和高度，交流叠片磁系统芯柱的尺寸比例关系及形式等有关。

从1914年起开始研究关于电磁铁几何关系的最优化问题〔文献4〕。近几年来，在电磁铁优化设计方面进行了许多研究工作〔文献5—27,68〕。

有关这方面的研究工作可分为三类：

第一类是讨论电磁铁的磁，电和热特性之间的关系，在这种关系下其系统的最优准则达到极值。

第二类是讨论在一定的条件下几何关系是最优的。这里也包含选择决定吸力特性形状的工作气隙的磁感应强度，电磁铁的发热和经济指标。上述的研究工作是讨论静态工作状况。

第三类是讨论电磁铁的某些尺寸和结构参数对其动态特性的影响，这方面的研究工作是为数不多的。

在第一类和第二类研究工作中电磁铁的吸力和拟定功如同机械装置一样是它的基本特性。拟定功等于对应一定衔铁位置时吸力与其最大行程的乘积：

$$A_y = F(\delta_0 - \delta_n)$$

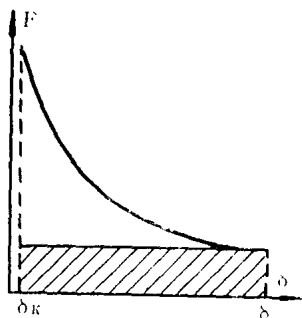


图 1 拟定功的确定

从图 1 看出，拟定功是吸力特性形状和衔铁位置的函数。对于个别型式的电磁铁（例如，对于吸入式电磁铁）其吸力特性可能具有《陷落》形状，拟定功决定于在该段衔铁行程区域内的最小吸力乘以行程。

同样，也利用电磁铁极限功的概念〔文献 5, 8〕，即

$$A_{\text{极限}} = \int_{\delta_0}^{\delta_k} F d\delta.$$

在文献〔6、9〕以及其它文献中把结构因素作为电磁铁的基本特性，结构因素由下式决定：

$$\pi = \sqrt{F/\delta}$$

在苏联的设计实践中首次利用结构因素是以文献〔9〕为基础的，而后多次在文献〔6、11〕以及其它文献中介绍过。在上面列举的研究工作中给出最优几何比例关系和气隙磁感应随结构因素变化的数据。上述比例关系表示结构经济性的指标最大（在苏联文献中——质量因素），它决定于电磁铁重量与沿衔铁行程的最大拟定功的比值。上述关系的获得，其电磁铁的条件具有大致相同的

拟定功和长期工作时的温升。

于不同时期发表的研究著作的主要结论介绍如下。

在文献[5]中研究了电磁铁拟定功和极限功的关系。结果表明，产生最大拟定功的条件为工作气隙磁阻和导磁体其余部分的磁阻相等。即：

$$R_0 = R_\mu \quad (8)$$

在这种条件下当机械负载为常数时最大拟定功只是极限功的四分之一。上述关系是在理想条件下得到的，即气隙磁场是均匀的，不存在漏磁通和导磁体不饱和。电磁铁的拟定功与其特性间的关系由下式确定：

$$\Lambda_v = K\tau G_0 G_s G_\tau, \quad (9)$$

式中 K —与单位系统有关的系数； $G_0 = \mu_0 S / \delta$ —气隙磁导； $G_s = W^2 / R$ —线圈窗口的电导； W 和 R —线圈匝数和电阻； $G_\tau = P / \tau$ —线圈热导； τ —温升。在文献[8]中给出极限功 Λ_{npox} 与电磁铁特性的关系。当钢导磁率 $\mu_{c\tau}$ 等于常数和气隙磁场是均匀的条件下，则

$$\Lambda_{\text{npox}} = K'\tau G_0 G_s G_\tau \frac{\frac{\delta_0}{\delta_k} - 1}{\left(\frac{l_M S_\delta}{\delta_x \mu_{c\tau} S_M} + 1\right) \left(\frac{l_M S_\delta}{\delta_0 \mu_{c\tau} S_M} + 1\right)}, \quad (10)$$

当 $\mu_{c\tau} = \infty$

$$\Lambda_{\text{npox}} = K'\tau G_0 G_s G_\tau \left(\frac{\delta_0}{\delta_x} - 1\right), \quad (11)$$

式中 K' —与单位制有关的系数； l_M —导磁体的长度； S_δ 、 S_M —导磁体和气隙的截面积。

文献[11、13和14]是对各种不同用途，工作制和结构形式电磁铁运行经验的综合介绍。研究工作的主要内容是确定几何关系，使其一定的优化准则达到极值（吸力最大，体积最小，消耗功率最

小等等)。这时，确定极值的因素表示成一个变量〔文献5、7、18和20〕或者两个变量〔文献15、19、21、22和23〕的函数形式。这些变量通常采用 d/D 、 l/D 或者 D/D_1 ，式中 $d = 2r_c$ ； $D = 2C$ （图2和3）。因此，探讨所得到的函数的极值，即找出上述关系的最优值。这时函数的形式与它组成时所采用的假定有关。例如，在所有的研究工作中假定气隙磁场是均匀的，不存在漏磁通，或者认为电磁铁的磁场图形与尺寸比例没有关系〔文献22、23〕。同样，认为导磁体钢是不饱和的。在文献〔7〕中，螺管式电磁铁的吸力公式写成壳体的外径与内径比值 $\theta = D/D_1$ ，的函数关系：

$$F = q(\theta - \sqrt{1 - \theta^2})(1 - \theta^2)/(\theta + \sqrt{1 - \theta^2})$$

式中

$$q = \frac{0.64 \cdot 10^{-8} \pi^2 K_3 P l D^2}{4\rho(l\mu/\mu_{cr} + \delta)}$$

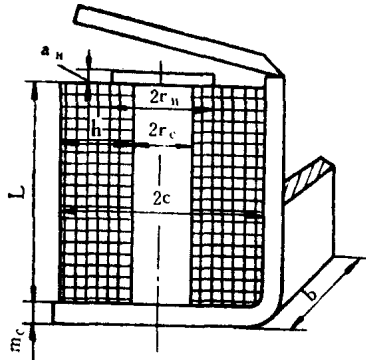


图2 拍合式电磁铁

除了上述假定外，当研究 $F = f(\theta)$ 关系的极值时认为消耗功率 P ，磁力线平均长度 l_m 和导磁体钢的平均导磁率 μ_{cr} 与几何尺寸没有关系。这时所得到的最优关系的数据与其他作者的结论一并列在表1和2中。

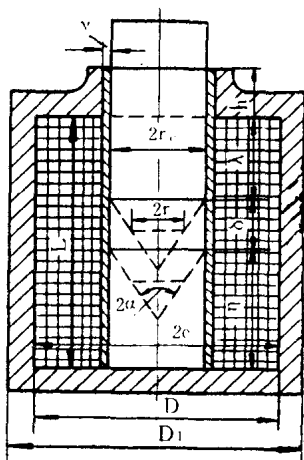


图 3 螺管式电磁铁

在文献〔5、24—26〕中分析了几何尺寸对电磁铁动特性的影响，并决定了达到最小动作时间的条件。因此，在文献〔24〕中，关于衔铁运动时间是在数字计算上用数值方法求解电磁铁的动态方程得到的，组成这些方程式时假定不存在漏磁通和扩散磁通，并忽略钢的磁阻。根据求解的结果得出运动时间与电磁铁结构参数相联系的综合变量间的关系曲线，并用近似方程表示。触动时间也表示为同样变量的函数，并在研究触动和动作时间的极值时得出线圈的匝数，当已知电磁铁磁极截面积时这个匝数使其动作时间最小。

螺管式电磁铁 (图 3)

表 1

文献来源	最 优 关 系					给定条件
	d/D	l/d	η/d	D/D ₁	优 化 则 则	
文献 6	0.55	—	—	—	重量最小	F = const; K ₃ = const
" 7	0.54	—	—	0.879	吸力最大	D = const; l = const
" 13	0.25—0.50	1.0—5.0	0—0.5	—	—	—
文献14 短行程的	0.5—0.55	1.2—2.5	0.3—0.5	—	—	—
长行程的	0.55—0.62	1.8—3.2	0—0.2	—	—	—
文献11 短行程的	0.4—0.5	2.5—5.0	0.57—0.62	—	—	—
长行程的	0.4—0.5	—	—	—	—	—

拍合式电磁铁 (图 2)

表 2

文献来源	最 优 关 系					给定条件
	d/D	l/d	d _n /d	S _{нрмк} срррм	优化准则	
文献 5	0.53	1.0—7.0	—	—	功率最小	D = const; l = const
" 13	0.24—0.63	0.5—8.0	—	1.0—4.0	—	—
文献14	—	—	—	—	—	—
小尺寸的	0.4—0.5	3.0—6.4	1.1—1.2	—	—	—
大尺寸的	0.5—0.66	1.0—3.0	1.4—1.5	—	—	—
文献19	0.62—0.69	0.45—1.6	—	—	体积最小 费用最少	— —
	0.65—0.8	2.3—2.83	—	—	—	—
文献20	0.6—0.65	—	—	—	吸力最大	D = const
文献22	0.57—0.7	1.0—3.0	—	—	机械功最大	D = const
文献23	0.57—0.7	1.0—5.0	—	—	机械功最大	D = const
文献21	0.5	0.5	—	—	吸力最大	V = const
当给定电流时	0.66	—	—	—	磁通最大	V = const
当给定电压时	0.66	0.39	—	—	吸力最大	V = const
文献21	0.78	—	—	—	磁通最大	V = const
"	0.23—0.5	2.0—4.4	—	—	吸力最大	P = const k ₃ = 0.1—0.9
"	0.72—0.76	—	—	—	吸力最大	费用等于常数

在文献〔25〕中分析了线圈电感对触动时间的影响。当反作用力为常数的条件下，并根据文献〔24〕中的假定进行计算。

当气隙为 δ_0 时线圈电感由下式决定：

$$L_0 = \frac{\mu_0 S}{\delta_0} W^2,$$

式中 W —线圈匝数； S —磁极截面积。

触动时间由下式决定：

$$t'_{\tau p} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - \frac{R}{U} \sqrt{\frac{2F_{np} \delta_0}{L_0}}}$$

应着重指出，存在使触动时间为最小的电感最优值。

为了确定衔铁运动时间在文献〔25〕中动态参数表示为幂级数形式的时间函数。文献〔25〕的作者仅取 $x = f(t)$ (x —磁铁行程) 级数的第一项得到触动时间的公式，根据这个公式从运动时间最小的观点得出最优的线圈电感。

把电磁铁的特性同结构参数联系起来的上述公式，以及作为最优几何关系的数值，可以作出一些结论。

为了评价电磁铁的类型及技术经济指标在文献〔5、6、11〕中利用了有效的拟定功 A_v 的概念，可以很简单地确定它的数值，并可以对电磁铁的各种不同结构进行相互比较。同时应该注意到，当衔铁行程与负载无关时 A_v 的最大值能够反应电磁铁的特点。在实际上电磁铁的反作用力与衔铁行程具有复杂的特性。在这些情况下可以看出，按着最大的有效拟定功选择的电磁铁从吸力特性和反力特性形式的观点上看不是最优的，显然，由静吸力同衔铁行程的乘积所决定的有效拟定功不能反应电磁铁的动特性，因为它不仅与电磁铁本身有关，而且还与使电磁铁运动的机构有关。

由于动作时的反电势与自感电势的缘故，由静吸力特性决定的极限功是不真实的。当衔铁运动时这个功的任何部分都同决定

电磁铁动特性的因素有关。当确定动特性时这个问题具有头等重要意义。后面在具体例题中给出直流螺管式电磁铁的动作过程数学模型设计的结果〔文献27〕。

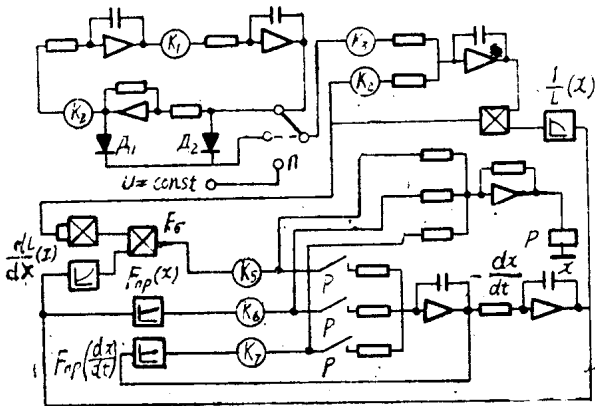


图 4 根据方程式(12)–(14)组成的模型框图

在图 4 中按下列方程组成模型框图

$$U = iR + d(Li)/dt; \quad (12)$$

$$F = m_x d^2x/dt^2 + F_{np}(x); \quad (13)$$

$$F = (i^2/2) (dL/dx), \quad (14)$$

式中 U —线圈电压； L —线圈电感(取 $L \approx f(i)$)； $F, F_{np}(x)$ —电磁吸力和反作用力； m_x —按衔铁归算的运动分部的质量。

在电子模型上研究电磁铁的动态过程。图5给出大多数电器所具有的典型的反力特性。在研究过程中力 $F_{np1}, F_{np2}, F_{np3}$ 和 F_{np4} ,