

自动补偿装置的 电子放大器

Д. Е. 波洛尼可夫

科学出版社

73.455/3
313

自动补偿装置的电子放大器

Д. Е. 波洛尼可夫 著

朱 宝 琰 译

3k478/07

科学出版社

1963

Д. Е. ПОЛОННИКОВ
ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ
АВТОМАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ

Государственное издательство
физико-математической литературы
Москва 1960

內 容 簡 介

本书着重地研究了自动补偿装置电子放大器的各种线路、计算及其设计方法;书中对于自动补偿装置电子放大器的各种特点,特别是对于有关构成放大器输入电路和输出电路问题、防干扰问题以及保证获得高灵敏度等问题均进行了极其详尽的研究。

本书可供从事自动学、电子学及仪器制造方面工作的研究人员、工程技术人员及大学高年级学生参考。

自动补偿装置的电子放大器

Д. Е. 波洛尼可夫 著

朱 宝 琛 译

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

1963 年 10 月 第 一 版

书号: 2850 字数: 230,000

1963 年 10 月 第一次印刷

开本: 850×1168 1/32

(京) 0001—4,200

印张: 8 7/8 插页: 1

定价: 1.50 元

基本量的代号

C_{BX}	输入电容
C_g	栅极电路中的隔流电容器
C_{Hg}	灯丝电路与控制栅极之间的电容
C_{Π}	寄生电容
C_d	动态电容器的平均电容
$C_{ш}$	在任一电路中旁接一个对地的电容
E_c	信号的电动势
E_{a0}	阳极电路电源的直流电压
E_{aH}	折合电压
E_{am}	电源电压的振幅
$E_{a\sim}$	阳极电源的脉动电压
E_{gm}	控制栅极上的电压振幅
E_{g0}	栅极上电压的直流成分
E_{Π}	干扰源的电动势
E_T	相当于起动电压的发送器的电动势
$E_{ш}$	噪声电动势
e	电子电荷, 自然对数的底
$F(p)$	传递函数
f_0	载频, 变换频率
Δf	通频带
$I_{a\Phi\Phi}$	阳极电流的有效值
I_{a0}	阳极电流的直流成分
I_B	电流的灵敏度阈
I_{Π}	寄生电流
I_g	控制栅极电流
I_T	起动电流
I_{θ}	帘栅极电流
i_a	阳极电流的瞬时值
K_{Π}	传递系数, 变换系数
K_T	变压器的传递系数
$K_{обш}$	总的放大系数
K_{cp}	平均放大系数
$K_{y.H}$	电压放大器的放大系数
$K_{y.M}$	功率放大器的放大系数

$K_{\text{кр}}$	相当于稳定度极限的临界放大系数
K_M	力矩灵敏度
$K_{M\Delta}$	电动机电矩灵敏度
K_C	栅极电路的放大系数
K_K	阴极电路的放大系数
k	波尔茨曼常数
M	电动机所产生的起动力矩
M_T	自动补偿装置可动系统的起动(阻力)力矩
n	变压系数
P_H	负载中所发出的功率
P_{H1}	负载中由一次谐波所发出的功率
P_{H0}	负载中由直流成分所发出的功率
P_a	阳极所耗散的功率
P_{Π}	电源所消耗的总功率
$P_{\text{вых}}$	输出功率
p	复变数
Q	回路的质量因数
Q_i	第 i 次充电
R	电阻
R_a	阳极电阻
R_B	与放大器输入端串联的电阻
R_{BH}	内阻
R_{BX}	输入电阻
$R_{BX.c\phi}$	平均输入电阻
R_K	阴极电阻
$R_{\text{ш}g}$	栅极电路中阻抗的有功成分
R_g	栅极电路中的漏洩电阻
$R_{\text{ш}a}$	阳极电流散粒效应噪声的等效电阻
$R_{\text{ш}n}$	电子管噪声的等效电阻
R_{Π}	损耗电阻
R_O	在谐振下并联回路 L, C 的等效电阻
$R_{\text{доп}}$	与输入端串联的附加电阻
R_{Θ}	等效电阻
$R_{\text{нак}}$	灯丝电路电阻
R_{BH}	整流器的内阻
R_H	负载电阻
R_i	电子管的内阻
s	电子管的静互导
s_f	频率选择系数

s_{φ}	相位选择系数
s_{11}	輸出端一次諧波对輸入端一次諧波寄生电压的选择性系数
s_{12}	輸出端二次諧波对輸入端一次諧波的选择性系数
s_{22}	輸出端二次諧波对輸入端二次諧波的选择性系数
$S_{\varphi 1}$	輸出端一次諧波的相位选择系数
$S_{\varphi 2}$	輸出端二次諧波的相位选择系数
T	絕對溫度
T_0	載頻周期
T_{BX}	輸入端的时间常数
T_{TP}	变压器的时间常数
T_{Θ}	等效时间常数
T_{Φ}	滤波器的时间常数
$T_{\text{ИИК}}$	自动补偿裝置全刻度指針的傳輸時間
t_1	中間触点与第一触点閉合的时间
t_2	中間触点与第二触点閉合的时间
$\Delta t_{\text{ИЛ}}$	振动变流器中間触点的飞越時間
$\Delta t_{\text{ИИК}}$	触点的重迭時間
U_{BX}	輸入电压
$U_{\text{ВЫХ}}$	輸出电压
$U_{\text{ВЫХ}1}$	一次諧波輸出电压
U_c	信号电压
U_C	加在电容器上的电压
U_{Π}	干扰电压
$U_{\text{ш}}$	总的均方根噪扰电压
U_{g^0}	栅偏压
U_{CM}	磁調制器中的偏压
U_{Θ}	帘栅极上的电压
U_T	起动电压
U_B	电压灵敏度閾
U_H	灯絲电压
$U_{\text{шТ}}$	均方根热噪扰电压
$U_{\text{ш}g}$	栅流散粒效应的均方根噪扰电压
$U_{\text{ш}a}$	阳极电流散粒效应的均方根噪扰电压
$U_{\text{з.н}}$	非灵敏区
$U_{\text{ш.}\Phi}$	均方根閃爍效应噪扰电压
$U_{\Pi 0}$	$Z_g = 0$ 时的干扰电压
$U_{\text{ИИК}}$	相当于自动补偿裝置全刻度的电压
$U_{\text{ДР}}$	零点漂移电压
$U_{\text{сд}}$	零点移动电压

U_{π}	加在电动机控制繞組上的电压
$U_{T\pi}$	电动机的起动电压
W	匝数
X	补偿机构的位移
Δx	失配信号
Y	被测参数
Z_{BX}	輸入阻抗
Z_{BH}	內阻抗
Z_g	栅极电路中的阻抗
Z_H	負載阻抗
α_{BX}	相当于 U_T 的信号与在輸入端所出現的干扰之比
α_{BHX}	相当于 U_T 的信号与放大器輸出端干扰之最小可容許比值
β	反饋电路的传递系数
β_{III}	信号与加在輸入裝置輸出端起伏噪声之最小可容許比值
δ_{II}	仪表的相对誤差
η_{III}	信号与加在放大器輸出端的起伏噪声之最小可容許比值
η	輸出級的效率
ε_0	阳极电流截止角
μ	电子管的靜态放大系数
ω	角頻率
ω_0	載波角頻率, 变换角頻率, 諧振頻率
ω_{II}	干扰角頻率
ρ	特性阻抗
φ	放大器(或其部件)所引起的相移
θ	相当于綫性区域的周期部分

前 言

电子自动补偿装置¹⁾是目前一项非常重要的自动化工具。它們可以用来测量和记录各种各样的电量和非电量。由于其简单、可靠和很高的精确度，不論在完成科学研究工作方面或是在工业中，都获得了广泛的应用。它們的作用不仅限于测量方面的课题，并且还可以用作各种自动调节系统中的组成部分。自动补偿装置在那些要求测量和记录大量各种量的复杂系统中，具有特殊重要的意义。

我国工业部門曾試制和生产了許多种高质量的自动补偿装置。但是目前对于这些自动补偿装置所提出的要求仍然在不断地增长，因而这就需要試制出一些更完善的装置。

自动补偿装置的一个主要部件乃是电子放大器。諸如誤差、灵敏度、快速作用、过渡过程形状、干扰防护性、可靠度、仪表的尺寸和价格等这一类重要的指标，在頗大程度上都取决于放大器的性能与特性。

自动补偿装置电子放大器具有一系列的特点，而这些特点在设计这种放大器时都是需要加以考虑的。然而，国内和国外在论述自动补偿装置試制方面的文献是很少的，并且根本没有什么著作曾对自动补偿装置电子放大器的研究及其计算方法进行过經驗总结。

本书应该成为上述这一空白的局部补充。书中着重研究了自动补偿装置电子放大器的各种线路及其計算和设计方法。

在資料叙述方面，作者力求尽可能避免重复文献中业已作了

1) 这里，我們把自动补偿装置理解为各种自动电位計、自平衡电桥以及与之相类似的仪表，而測量线路的連續自动平衡則作为这种自动补偿装置的基础。

充分闡述的低頻放大器的一般理論，而是詳細地研究了自动补偿装置电子放大器的各种特点。特别是对于有关构成放大器輸入电路和輸出电路問題、防止干扰問題以及保証获得高灵敏度問題，均进行了极其詳尽的研究。

本书沒有对数字自动补偿装置放大器、采用动态补偿的自动补偿装置放大器以及无电子管放大器进行分析研究，这是因为篇幅所限以及这些放大器的特性极其重要，需要采用独特的計算方法。

本书可供自动学、电子学及仪器制造业方面的专家参考用。书中所研究的一系列問題对于随动系統、自动补偿装置、測量放大器及它們的元件的研究和設計将有所裨益。

文献索引在方括号內給出。刊印在书后的参考文献概括了自动补偿装置电子放大器的設計問題以及与此有关的各種問題。作者在編制这些参考文献时，特別注意了高灵敏放大器，因为要設計这类放大器是极为困难的。

书中援引了一些科学研究工作成果，在完成这些科学研究工作时，苏联科学院通訊院士 B. A. 特拉別茲尼可夫曾給予宝贵的指示，作者对此表示深切的感謝。作者对于 H. A. 科罗列夫筹备手稿出版工作和 K. Э. 埃尔格里斯在評論时所作的有益建議，也表示非常感謝。在完成手稿时，曾获得 P. A. 瓦里托夫、T. B. 波利图格大力的协助，作者对此表示誠懇的感謝。

Д. Е. 波洛尼可夫

目 录

前 言	ix
第一章 自动补偿装置系统中电子放大器的工作特性、放大器的分类	1
§ 1. 自动补偿装置电子放大器的特性	1
§ 2. 放大器的特性对于自动补偿装置工作及性能的影响	5
§ 3. 自动补偿装置电子放大器的分类	11
第二章 自动补偿装置电子放大器的线路概述	14
§ 4. 交流放大器	14
§ 5. 直流放大器	26
§ 6. 采用高输入电阻的直流放大器	34
第三章 放大器线路的选择及基本特性的计算及确定	39
§ 7. 对于放大器所提出的一些要求	39
§ 8. 试制放大器的一些主要步骤	44
§ 9. 确定放大器的参数及特性曲线的实验方法	54
第四章 交流放大器的输入装置	72
§ 10. 对于输入装置所提出的要求	72
§ 11. 关于选择输入装置线路的一般要求	73
§ 12. 干扰源及防止干扰的方法	76
§ 13. 输入变压器的参数选择	88
§ 14. 输入电路的动态特性及选择性	96
第五章 直流放大器的输入装置	104
§ 15. 直流放大器输入装置的线路	104
§ 16. 采用接触振动变流器的变压器式输入装置	116
§ 17. 采用接触振动变流器的无变压器式输入装置	139
第六章 电流高灵敏放大器的输入装置	164
§ 18. 采用接触振动变流器的输入装置	164

§ 19. 采用动态电容器的输入装置·····	185
§ 20. 采用反馈来改进输入电路的参数·····	191
第七章 电压放大器 ·····	206
§ 21. 放大器线路及其元件的选择·····	206
§ 22. 电压放大器的选择性·····	219
§ 23. 放大器工作在非线性区域内的特性·····	227
第八章 功率放大器及电源 ·····	233
§ 24. 功率放大器的线路选择·····	233
§ 25. 阳极电路采用交流供电的功率放大器·····	244
§ 26. 阳极电路采用直流或脉动电流供电的功率放大器·····	264
§ 27. 电源·····	267
参考文献 ·····	271

第一章 自动补偿装置系统中电子放大器的 工作特性.放大器的分类

§ 1. 自动补偿装置电子放大器的特性

自动补偿装置电子放大器具有一系列能够把它們分成单独一类的特点.在沒有研究这种放大器的特性之前,让我们提示一下图 1 方块图自动补偿装置的作用原理. 被测量 y (它既可以是一个电量,也可以是一个非电量)将作用加到一个包含在测量装置 1 中的发送器上. 测量装置通常为一桥接测量线路或一电位计式测量线路, 它或者用直流电源,或者用交流电源. 在测量装置中,还包含有一个补偿元件.根据 y 值和补偿元件的位置,在测量装置的输出端将产生一失配信号 Δx , 该信号加到放大器 2 的输入端. 被放大的信号加到电动机 3 上,而电动机则移动着补偿元件,以使失配信号减少到很小值. 这样,便对输入信号实现了补偿. 在此情况下,补偿元件将跟踪着输入信号值. 因此,自动补偿装置乃是随动系统的一种变体;而它的放大器还起着比较装置(零机构)的作用. 与指示器或印码装置有着机械联系的补偿元件,其位置则用作读出或记录被测量,除此之外,为了保证稳定性和改善过渡过程,在自动补偿装置中通常还有一电动机转速反馈或失配值变化速度反馈.

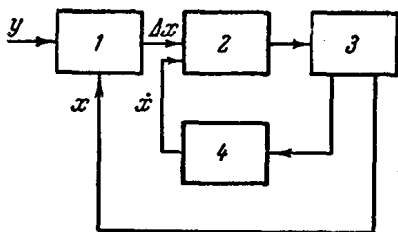


图 1 自动补偿装置的方块图

电子放大器的主要用途在于把来自测量线路的失配信号放大到能够转动电动机所必需的电平.

现在让我们来详细研究一下自动补偿装置电子放大器的特

性。根据仪表的用途不同，加到放大器输入端的信号既可以是直流，也可以是交流；电压值可以从十分之几微伏变化到几伏；测量线路的输出阻抗可以从数十欧姆变化到 $10^9 \sim 10^{11}$ 欧姆。测量线路输出参数的这种多样性，就要求放大器的输入装置有着很大的通用性。否则，就需要有大量各种不同的放大器变体，而这在进行大量生产时是非常不适当的。

自动补偿装置电子放大器的另一个特点，则是有着比较高的灵敏度，亦即有着较低的灵敏度阈。这里，我们将自动补偿装置电子放大器的灵敏度阈理解为在放大器的输出端能够产生可靠地区别于噪声和干扰、并足以克服电动机在系统中¹⁾所产生的摩擦力矩的载频一次谐波电压的最小输入信号(电压 U_s 或电流 I_s) 值。例如，在测量较窄范围的温度时，灵敏度阈应为数微伏，而有时为十分之几微伏。在红外光谱测定中以及在进行气体分析时，都需要有这样数量级的灵敏度阈。在测定离子浓度(在 pH 测定中)时，在质谱仪测定中，在某些生物学范畴中以及在使用那些利用放射性同位素的发送器的工作中，都需要测量 $10^{-14} \sim 10^{-11}$ 安培这种数量级的电流(有时则为 $10^{-16} \sim 10^{-15}$ 安培)。这样高的灵敏度，使得构成放大器的方法具有一系列的特点。

高灵敏度的自动补偿装置电子放大器，在很多方面与电测放大器相似，但是，其本身却具有很多特点。作为零机构工作时，并不要求自动补偿装置放大器具有测量放大器那样高的放大系数稳定度。但是，另一方面，自动补偿装置电子放大器应保证获得很高的零点稳定度，而零点的调整则在绝大多数情况下是不能容许的。

在自动补偿装置中，电动机与放大器串联，并要求有很大的开路传递系数值，因此，要保证稳定度将是非常困难的，特别是在快速作用的仪表中。要想保证稳定度和获得非周期的过渡过程，则在放大器的输入端除了供给一失配信号外，通常还要供给失配信号的微商或与电动机转速成比例的信号。而要想保证获得快作用

1) 关于灵敏度及灵敏度阈的更详细的讨论请参看第 56 页。

的过渡过程的最佳形状，則要求失配信号与和电动机轉速成比例的信号之間具有非綫性关系(參看文献[17])。放大器应具有良好的动态特性；最好它是一个对有效信号为一具有极小時間常数的一阶慣性环节。这样，就使得高选择性的要求变得很复杂，特别是在那些采用高輸入电阻的放大器中；然而，正是在这类放大器中选择性往往是非常重要的。

除了有效信号外，几乎总是有寄生电压从測量綫路那里加到放大器的輸入端。在电感或电容发送器的情况下，寄生电压是由工作頻率的高次諧波和一次諧波的无功成分(对有效信号相移 90°)組成。在直流发送器的情况下，寄生信号的頻率通常与供电电网的頻率相重合。寄生电压加到放大器的輸入端，并且可以引起仪表产生很大的附加誤差。为了避免发生这种情况，就需使放大器具有相当的选择性，办法是采用一輸入变换器，使得通頻带变窄，并保証相敏特性。保証选择性，經常与要求有很高的灵敏度和动态精确度相矛盾。因此，在一系列的情况下，都需要寻求一些新的途径来保証所需要的选择性。

在強的輸入信号过载下工作在非綫性区域内（这通常是不可避免的，例如在多点式記錄仪表中），这也是自动补偿装置放大器的一种特点。在強的过载下，在放大器中是不容許有很大的相移的，这是因为如果不这样，将显著降低放大器的輸出功率，亦即将显著降低仪表的快速作用。在去掉过载后，放大器中的过渡过程应迅速地得到衰减，否則，也将降低仪表的快速作用，并且将使得仪表的指針有着特殊的“爬行”到稳定值的現象。放大器的上述工作特性，使得对其綫路提出了一些特殊的要求。

不同于一般的低頻放大器，在自动补偿装置放大器中，非綫性的畸变实际上是不起什么作用的。这是因为一方面放大器是作为一零机构工作的，另一方面它的負載則是一可逆电动机。在絕大多數的自动补偿装置中，都采用双相异步电动机。电动机的一个繞組作控制繞組用，并被接在放大器的輸出端，电动机的另一个繞組則通过一相移电容器被接到电力网中，如图 2a 所示。参数 R_1 、

C_1 是这样地进行选择的, 即使得在电路绕组上保证有一所要求值的电压 U_n , 并且对电网电压相移 90° (图 26), 电容器 C_2 与控制绕组并联, 它减少高次谐波的等效负载电阻和增加一次谐波的等效负载电阻。

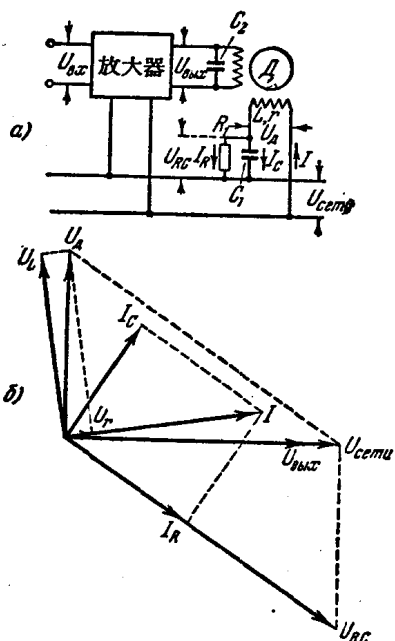


图 2 a) 接在放大器输出端的双相异步电动机的接线图。b) 双相异步电动机电路绕组中电压及电流矢量图

异步电动机由于其内没有整流子和内摩擦, 因而较之直流电动机具有较小的非灵敏度和较大的可靠度。除此之外, 按图 2 线路图连接的双相异步电动机, 还可使系统具有很高的选择性, 这是因为只有一次谐波的有功成分才产生转矩。因此, 在放大器的输出端可容许有很大的各种脉动及干扰电平, 而这在一系列的情况下将可降低对放大器选择性和整流器 (此处指的是全波整流器) 输出端脉动电平的要求。根据这一原理, 放大器的非线性畸变是没有实际意义的。

采用双相异步电动机, 就要求放大器输出端有效信号的相位及频率与供电电网电压的相位及频率相重合。因此, 在直流信号下 (不论对零点稳定度的要求如何), 在自动补偿装置放大器中经常采用着一个将直流电压变换为载频电压包络的变换器。

在采用交流供电的测量线路情况下, 电动机经常是用同一电网供电的, 同时, 在测量线路本身中则将被测量的参数变换 (调制) 为载频电压的包络。因此, 自动补偿装置放大器一般都工作在固定的载频下 (通常为 50 赫), 因而, 它可以有着很窄的通频带。频带变窄则只是受到供电电网频率稳定度和对放大器选择性及动态特性所提出的要求两者的限制。

每年都需要有大量的各种各样的自动补偿装置。因此，放大器的许多特性将取决于生产的大众性，特别是对于各种各样的放大器变体来说，它们应该尽可能地标准化、便于生产和价格低廉。

自动补偿装置在大多数情况下是用于工作在生产条件下，这就要求放大器具有下列一些相应的特性：很少受到外部磁场作用的影响，很少受到电网频率及电压和周围温度的影响，具有足够大的机械强度，并且能可靠地运转。

由于有必要在接线板上安装大量的仪表，因此，近些年来急剧减小放大器尺寸的趋向就更显著了。

从上面所列举的自动补偿装置电子放大器的特点，我们可以看出在试制和设计这些放大器时是需要考虑一系列为一般用作无畸变地放大电压的低频放大器所没有的因素。下面将说明自动补偿装置电子放大器的线路计算及构成方法也具有其本身的特点。

§ 2. 放大器的特性对于自动补偿装置工作及性能的影响

自动补偿装置的优点及应用范围，取决于一系列的特性，其中的大多数则与零机构（亦即放大器）的参数及特性有关。从这个观点来看，下列一些特性将是最重要的：

- a. 基本相对误差，它决定着在正常工作条件下的仪表等级；
- б. 附加误差，它表征着诸如温度、湿度变化、周围磁场强度变化、供电电网参数变化这些外部因素对于仪表读数的影响；
- в. 误差与连同发送器有效信号一起加到仪表输入端的寄生信号电平之间的关系，或者是所容许的干扰电平——亦即仪表的干扰防护性；
- г. 被测量的量程，亦即仪表的刻度；
- д. 测量线路的数目及变体型式以及将它与各种发送器结合在一起的可能性；
- е. 仪表的动态特性（指针通过全刻度的时间，过渡过程的形状），它们决定着动态误差；

ж. 仪表的尺寸及价格。

以上所列举的自动补偿装置的特性，在不同程度上都取决于放大器的特性。在仪表的基本误差中，如所众知，是包含有许多成分的，其中一个成分则决定于仪表的非灵敏区。当被测量在不大的范围内变化时，在测量线路输出端所产生的失衡电压将不足以转动可逆电动机和仪表的指针。仪表的非灵敏区，一方面决定于测量线路各个可动部分的摩擦力，另一方面也决定于放大器的灵敏度。

如果用 U_T 来表示足以起动仪表可动系统的放大器输入端的最小电压，则非灵敏区可用 U_T 表示如下：

$$U_{г.н} = \frac{2U_T(Z_{вх} + Z_{вн})}{Z_{вх}}, \quad (1.1)$$

式中 $U_{г.н}$ ——表示在无载运转状态下测量线路之失衡电压， $Z_{вх}$ ——放大器的输入阻抗， $Z_{вн}$ ——测量线路的输出阻抗（内阻）。

U_T 值可以用放大器的总的放大系数 ($K_{общ}$) 和折合到电动机轴上、在可动系统起动下的摩擦力矩 (M_T) 来表示：

$$U_T = \frac{M_T}{K_{м.д} K_{общ}}, \quad (1.2)$$

式中 $K_{м.д}$ ——电动机起动力矩¹⁾与电动机绕组上有效信号电压之间的比例系数。由于存在有非灵敏区而引起的相对误差，乃是 $U_{г.н}$ 与相应于仪表全刻度的电压 $U_{мк}$ 之间的比值。将等式(1.1)的两部分除以 $U_{мк}$ ，并将式(1.2)的 U_T 值代入，我们便得到仪表相对误差与放大器参数之间的关系式：

$$\frac{U_{г.н}}{U_{мк}} = \frac{2M_T(Z_{вх} + Z_{вн})}{K_{м.д} K_{общ} U_{мк} Z_{вх}}. \quad (1.3)$$

从式(1.3)我们可以看出由于存在有非灵敏区而引起的相对误差，是随着在更宽范围内进行测量时放大器总的放大系数之增大（亦即随着仪表刻度 $U_{мк}$ 的增大）而减小的。

1) 这里我们把起动力矩理解为制动电动机所产生的力矩，亦即在零速度下所产生的力矩。