

连续式轧机电动机转速的 自动调节与测量

〔苏联〕C. C. 罗依津 И. М. 施捷因 B. A. 基勃里茨基 著
龐樹萱 朱暢宏 譯

內 容 提 要

本书研究以高精度自动保持电动机轉速及測速方面的問題。书中介紹了一些最常用的自动調速綫路,并列举了两种实际軋机电力拖动裝置的綫路及特性,所述綫路中采用可保持电动机轉速的誤差小于0.5%的頻率式測速发电机。此外,还介紹两种轉速精測系統——采用基准石英振荡器的系統及利用半导体元件的数字系統。

本书可供从事軋鋼电力拖动的工程技術人員、設計人員及大专学生参考。

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

С. С. Ройзен, И. М. Штейн, В. А. Киблицкий

Госэнергоиздат · 1962

連續式軋机电动机轉速的自动調节与測量

龐樹萱 朱暢宏 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海市印刷六厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 3 24/32 排版字数 81,000

1965年10月第1版 1965年10月第1次印刷

印数 1—3,800

統一書号 15119·1831 定价(科六) 0.44 元

前 言

各种电力拖动装置經常要求精确地和自动地保持給定的轉速。例如,金属切削机床,根据工艺要求选定的进刀速度应当保持不变,而与电动机負載、网路电压和温度变化以及其他外部条件无关。在軋制生产中,特别是对于連續式軋机,如要滿足工艺軋制制度和避免拉断金属,同样也要求精确保持給定轉速,其他还可列举出許多类似这样的例子。由于現代工业在工艺过程和自动化方面的日臻完善,从而使得电力拖动装置以高精度工作的必要性亦与时俱增。

如果在10~15年前,电力拖动装置的工作轉速对給定轉速的偏差为 $\pm 1\sim 2\%$,那么,現在这个偏差的要求則为不大于 $\pm 0.5\%$,甚至更小。因此,过去解决轉速精确保持这一問題所采取的技术措施,今天在某些情况下已显得不适用了,必須另寻求新的措施和办法。

采用連續式軋机軋制金属是一种最有效的加工方法,因为它可以使单位設備重量获得較高的生产率、并可改善产品表面质量和降低电能消耗,而尤为重要是可以为生产过程綜合自动化創造条件。

近年来已設計和制造成不少大型連續式軋机,而且今后連續式軋机在整个軋鋼生产領域內所發揮的作用,还将日益增加。

連續軋制过程中,金属同时处于数台机架之中,因此,無論在靜态或动态下,对精确保持各机架的給定轉速,均有較高的要求。

在某些情况下,要求靜轉速偏差不超过 $0.3\sim 0.5\%$;恢

复時間不大于0.2~0.3秒。对于这类連續式軋机的电力拖动,可以列为是极其复杂和十分重要的电力拖动装置。

現代連續式軋机的机架一般均采用单独拖动。过去所采用的成組拖动方式,对于生产率极高的現代化連續式軋机來說,实际上已不适用。因为机架采取成組拖动时,将使軋机的机械部分十分复杂,机架的孔型設計和調整也比較困难,从而显著限制了軋件的品种,也沒有帶活套进行自由軋制的可能。因此,目前只是对軋件品种比較单一的綫材軋机,或电动机容量不大的連續軋机,才适宜采用成組拖动。連續式軋机机架的拖动电动机,要求調速范围較广和保持轉速精确,由于直流电动机可作平滑的調节,并且可使拖动装置具有良好的靜和勁特性,因此,現代連續式軋机普遍采用直流电动机拖动。鉴于上述情况,本书中对于采用其他型式电动机的电力拖动,将不予討論。

直流电动机可用两种方法来实施低电耗調速,即改变加于电动机电樞的电压和改变电动机的激磁磁通。

单独拖动的連續式軋机,可按单独組合綫路供电,即每台电动机各由单独的变流器供电;也可按并联綫路供电,这时,全部电动机由一台总的变流器供电。

按单独組合綫路供电时,大多采用可控汞弧整流器作为变流器,这样,电力拖动装置可得到极好的动态指标和寬广的調速范围。当按并联綫路供电时,每台电动机則靠改变电动机的激磁电流来調速,因此不可能得到象可控汞弧整流器单独組合綫路那样快速作用的調节系統。

目 录

前 言

第1章 直流电动机轉速的自动調节	1
1. 在电樞回路采用電比較的轉速自动調节綫路	1
2. 調节器各环节的靜傳遞特性	3
3. 閉环調节系統的方程式	9
4. 开环系統的傳遞特性	13
5. 在电樞回路采用磁比較的轉速自动調节綫路	15
6. 用在激磁回路的轉速自动調节綫路	20
第2章 直流电动机轉速調节器靜誤差的計算	22
7. 誤差的計算方法	22
8. 在电樞回路內进行調节时,轉速穩定系統的靜誤差計算	24
9. 在激磁回路进行調节时靜誤差的計算	25
第3章 調速与測速用的測速发电机	29
10. 測速发电机的誤差	29
11. 頻率感应測速发电机	30
12. 頻率感应測速发电机的变换裝置	33
13. 頻率电容式測速发电机(变送器)	41
第4章 电动机由并联綫路供电的連續式軋机的電力拖动	45
14. 电动机激磁繞組的桥式联接綫路	45
15. 鋼管減徑机的電力拖动	51
第5章 电动机由单独組合綫路供电的連續式軋机的電力拖动	65
16. 電力拖动裝置的基本元件	65
17. 連續式冷軋鋼管軋机的電力拖动	68
18. 電力拖动裝置某些环节的特性	73
第6章 連續軋机机架的差頻式轉速精測系統	83
19. 差頻式轉速精測系統的工作原理	83

20. 轉速精測設備的基本元件	86
21. 轉速精測系統的单通道綫路全圖	92
第 7 章 連續式軋機机架的數字式轉速精測系統	94
22. 技術要求、動作原理及系統結構圖	94
23. 標準振蕩器	99
24. 觸發器,計數十進位器	100
25. 數字指示	106
26. 代碼轉換器	109
27. 結構	113
參考文獻	113

第 1 章

直流电动机轉速的 自动調节

1. 在電樞回路采用電比較的轉速自动調节綫路

要使电动机精确地保持給定轉速,必須采用帶有反饋(一种或几种反饋)的自动調节系統。在轉速自动保持系統中,一定要有电动机轉速的硬負反饋,而对于轉速保持有特別精确要求的場合(例如,誤差小于1.0%),則应采用帶測速发电机的轉速硬負反饋。引入轉速反饋的其他各种方法,由于精确度較小,故不拟在本书內討論。

图1为保持电动机給定轉速的,不可逆自动調节綫路方案之一。这种方案的特点是,标准电压电源和用作反饋回路測量元件的測速发电机(其电压正比于实际轉速),彼此反向接在放大器的輸入端上。

放大器的輸入电压 U_{BX} , 等于取自电位計(R_1 、 R_2)的給定电压 U'_1 和取自电位計(R_3 、 R_4)的反饋电压 U'_2 之差,即

$$U_{\text{BX}} = U'_1 - U'_2 \quad (1)$$

首先假定,放大器輸入端所需要的电流比流經两个电位計的电流要小很多倍。这样就可认为电压 U'_1 与电压 U'_2 的变化无关,反之亦然。由于引入了負反饋,因而調节器可使反饋

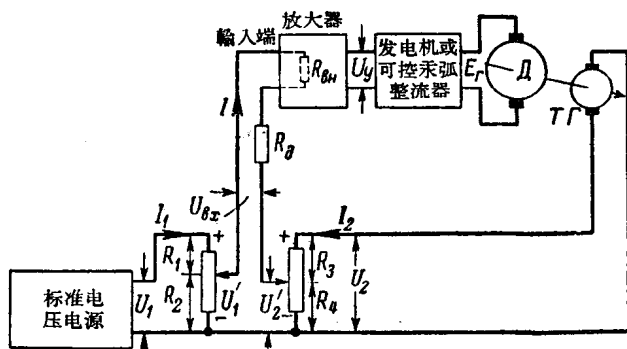


图 1 在电枢回路采用电压比较的转速自动调节系统

电压 U_2 自动保持接近于给定电压 U_1 。如果由于某种外因(例如在电动机的轴上突加负载),使电动机的转速下降,则测速发电机的电压亦将减小,因而放大器的输入电压增加,放大器输出端的电压亦相应增高。从而使电动机的转速升高,并接近于负载增加前的转速。

这个转速对给定转速(即电动机的稳态转速)的偏差,在很大程度上取决于放大器的特性。因此要求精确保持电动机给定转速的自动电力拖动装置,必须采用放大系数很高的放大器。

对所讨论的这种线路可用三种方法来改变电动机转速的整定值。第一是移动电位计(R_1 、 R_2)的滑动触点,减小(对标准电源电压来说)给定电压 U_1 ,以降低电动机的转速。第二是移动电位计(R_3 、 R_4)的滑动触点,减小(对测速发电机的电压 U_2 来说)反馈电压 U_2 ,以使电动机的转速增加。第三则是不移动电位计,而靠改变标准电源的电压 U_1 。

这些方法的区别,在于保持转速的精确度在不同的调节范围内可能是不同的。此外,当放大器输入端的电能消耗较

大时,改变一个电位計的整定值,将会影响另一个电位計的电压重新分配。因此, 电位計的电阻和放大器輸入端电阻之間的比值, 也对轉速的精确保持有影响。所有这些問題, 以后将在分析电动机人为机械特性方程式的基础上再来进行研究。

2. 調节器各环节的靜傳遞特性

放 大 器

放大器可以是电子的、电子-离子的、磁的、电机式的, 或者是这几种放大器的組合。在作靜态計算时, 最重要的是要知道, 放大器在輸出端接有实际負載并計入內电阻时的傳遞特性。通常傳遞特性都是用放大器輸出端的电压 U_y 对其輸入端电压 U_{bx} 的关系来表示, 并假定輸入端电阻 R_{bx} 等于內电阻 R_{BH} 及附加电阻 R_A 之和, 即

$$R_{bx} = R_{BH} + R_A \quad (2)$$

如果拖动装置是可逆的, 則所采用的放大器也应当是可逆的。对于可逆放大器的傳遞特性來說, 無論其結構如何, 通常都具有如图 2 所示的形状。图中 a 、 b 两点之間处于特性的綫性段 (或者可以假定为綫性段), 在这段內輸出电压正比于輸入电压

$$U_y = k_1 U_{bx} \quad (3)$$

比例系数 k_1 称为放大器的放大系数。在綫性段以外, 放大器“饱和”, 从而使放大系数减小。

对于不可逆拖动装置, 可以采用不可逆放大器, 在这种情况下采用磁放大器可以大大簡化放大器的結構和提高放大器的效率。但是在某些場合下(参閱第 4 章), 即使对不可逆电力拖动装置, 也有采用可逆放大器的。当綫路中使用不可逆磁放大器时, 必須注意其傳遞特性(形状如图 3 所示)在左象限

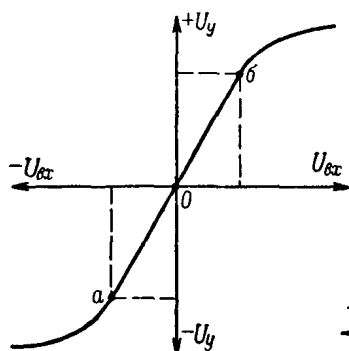


图 2 可逆放大器的特性

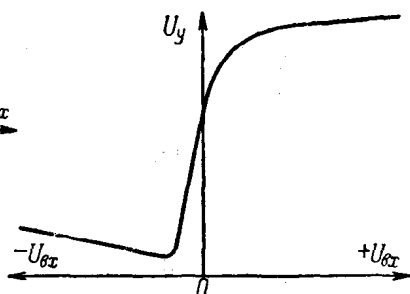


图 3 不可逆磁放大器的特性

內具有上翘的特性。

拖动装置在过渡状态的某些时间内（假定很短），可能出现反馈电压大于标准电压的情况。这时，磁放大器输入端电压的符号改变，并使其特性转移到左象限内。这时电动机转速的增高，将引起反馈电压对标准电压的偏差增大，这样不但不能使发电机或整流器的电压降低，相反地还将使其增高。由于磁放大器和发电机的电压已增高至极限值，所以转速自动调节的作用亦即终止。

为了避免这种情况，必须设法避免不可逆磁放大器过渡到其左侧的特性段上，为此，在磁放大器的控制绕组回路中，接入一个整流器。

发电机或可控整流器

继放大器之后，自动调节系统的下一个元件为发电机或可控汞弧整流器。目前汞弧整流器主要仍用于不可逆拖动装置，但是可以预期，在今后不长的时间内，汞弧整流器一定会扩大应用于可逆拖动装置中。

在所討論的綫路中,直流发电机的傳遞特性,为发电机电动势对施加于激磁回路电压的关系。这一关系可用图 4 中相对单位的磁化曲綫来表示。曲綫的初始段可认为是綫性的,于是可写出以下綫性方程

$$E_r = E_0 + k_2 U_y \quad (4)$$

为使上式簡化,可认为剩磁电压 $E_0 = 0$, 特别是在 U_y 和 E_r 变化不大的情况下, E_0 将不起任何作用

$$\Delta E_r = k_2 \Delta U_y \quad (5)$$

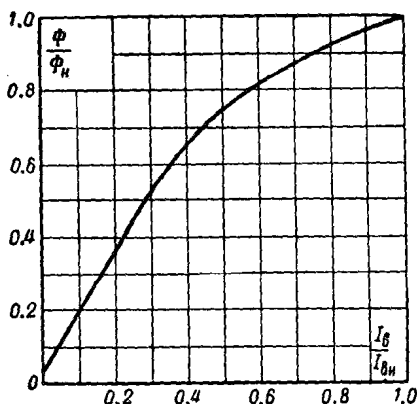


图 4 ПН 及 МП 型直流电动机的通用磁化曲綫

可控汞弧整流器的傳遞特性,即空載整流电压的平均值(为使結果具有共同性,也用 E_r 表示)对加于栅控装置輸入端的电压 U_y 之間的关系。如果栅控装置調整正确,則通常此特性曲綫的外形类似发电机的磁化曲綫,亦即具有綫性部分、“膝部”及“飽和区”。

因此,無論是直流发电机或可控汞弧整流器,对其傳遞特性的起始綫性部分,均可写成簡单的方程式

$$E_r = k_2 U_y \quad (6)$$

电 动 机

轉速自动保持系統的下一个环节是电动机。电动机的靜傳遞特性，即其穩态轉速与发电机或汞弧整流器空載电压之間的关系。此特性不仅应考虑电动机本身电樞电阻对轉速的影响，而且还应当考虑电源（即发电机或汞弧整流器）內阻的影响。

电动机轉速 n 对电樞电压 U_a 及激磁磁通 Φ 的关系，可用下式表示

$$n = \frac{E_a}{k_e \Phi} = \frac{U_a - I_a R_{a, \Gamma}}{k_e \Phi} \quad (7)$$

式中 I_a ——电樞电流；

$R_{a, \Gamma}$ ——电动机电樞回路的电阻；

k_e ——与电动机結構有关的系数；

E_a ——电动机电樞的电动势。

如果电动机系由发电机供电时，則

$$E_a = E_r - I_a R_a \quad (8)$$

式中， R_a 为发电机和电动机电樞回路的总电阻。由于磁通保持不变，因而可取符号

$$c_e = k_e \Phi \quad (9)$$

这样，我們便可得到电动机傳遞特性的方程式

$$n = \frac{1}{c_e} E_r - \frac{1}{c_e} I_a R_a \quad (10)$$

当电动机由汞弧整流器供电时，假定用 E_r 表示整流器的空載电压、 R_a 表示电动机和整流器中电压降的某一等值电阻，則靜傳遞特性的方程式对于整流电压的平均值仍保持着同样的形式。但是，这个等值电阻并非始終为一常数。汞弧整

整流器外特性的斜度，即表示其輸出端电压的平均值与平均負載电流間的关系。外特性的斜度不仅与电弧和变压器中的电压降以及由于阳极交錯所引起的电压降有关，而且还与負載电流曲綫的形状有关。为使整流器得到較硬的外特性（亦即使电樞回路的等值电阻較小），拖动装置必須在連續带电的状态下运行。为此，在电动机的电樞回路中接入电抗器，其电感可按这样选择，即使得在整个轉速調节及負載的調节範圍內，电流均处于連續状态。在这种情况下，即可认为整流器的外特性具有恒定斜度，且等值电阻与負載无关。

测速发电机

在精确保持轉速的系統中，可以采用各种测速发电机。下面在第3章中我們将从工作精确度的观点出发来对各种测速发电机进行比較。現在我們假定所采用的是直流测速发电机（如图1所示），則这个测速发电机的电动势 U_2 与其轉速关系的傳遞特性，应为通过坐标原点的一条直綫

$$U_2 = k_3 n \quad (11)$$

改变测速发电机的激磁电流，将使系数 k_3 发生变化。这里，我們暫且认为用某种办法可使激磁电流保持不变，且系数 k_3 为一常数。

比較环节

标准电压电源、标准电压电位計 (R_1 、 R_2) 和测速发电机的电位計 (R_3 、 R_4)，均属于比較环节。标准电压电源的内阻包括在电阻 R_1 內，而测速发电机回路的电阻則包括在电阻 R_3 內。放大器的輸入电阻 R_{bx} (包括放大器的内阻及附加电阻)，即連接在两电位計滑动触点(或抽头)之間的負載。因此

比較环节参数选择的正确程度，实质上就关系到調节系統工作的精确度。下面我們將对这个問題作比較詳細的討論。

比較环节可用放大器輸入端的电压 U_{BX} 对标准电源电压 U_1 和測速发电机电压 U_2 的关系来表示。根据綫路图中的三个回路，可分別写出三个电压平衡方程式，同时对 U_{BX} 求解，即可求得此关系式。

根据图 1 中所采用的表示符号，可以写出

$$U_1 = I_1 R_1 + (I_1 - I) R_2 \quad (12)$$

$$U_2 = I_2 R_3 + (I_2 + I) R_4 \quad (13)$$

$$i R_{\text{BX}} + (I_2 + I) R_4 - (I_1 - I) R_2 = 0 \quad (14)$$

求解上述方程式中的 I ，得

$$I = \frac{U_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{R_{\text{BX}} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} \quad (15)$$

輸入端电压为

$$U_{\text{BX}} = I R_{\text{BX}} \quad (16)$$

根据式(15)和(16)，可写出

$$U_{\text{BX}} = k_4 U_1 - k_5 U_2 \quad (17)$$

式中

$$k_4 = \frac{\frac{R_{\text{BX}} R_2}{R_1 + R_2}}{R_{\text{BX}} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} \quad (18)$$

$$k_5 = \frac{\frac{R_{\text{BX}} R_4}{R_3 + R_4}}{R_{\text{BX}} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} \quad (19)$$

式(17)表明, 所討論的电力拖动装置系一閉环自动調节系統。

$k_4 U_1$ 和 $k_5 U_2$ 并不等于图 1 中的 U'_1 及 U'_2 。这一概念十分明显, 而毋需再进行数学方面的演算, 例如, 改变 U_2 不仅会引起电压 U'_2 改变, 而且还将引起电压 U'_1 变化。

由式(17)可見, 当 U_1 为常数时, 放大器輸入端电压的变化, 与测速发电机电压的变化成比例

$$\Delta U_{\text{bx}} = -k_5 \Delta U_2 \quad (20)$$

系数 k_5 称为比較环节的傳遞系数。

由式(19)可見, 系数 k_5 的值, 取决于两电位計的电阻与放大器輸入端电阻之間的关系。

上述两电位計的电阻比 R_{bx} 愈小, 則比較环节的傳遞系数愈大。下面我們还要証明, 由于增大傳遞系数将可提高保持轉速的精确度。

如果比較环节系作用于电子放大器的輸入端, 此时由于电子放大器具有极大的輸入电阻, 所以可采用高电阻小功率的电位計。但当采用磁放大器或电机放大机时, 由于其控制繞組的电阻不大, 因此应当采用低电阻和功率足够大的两个电位計。

3. 閉环調节系統的方程式

閉环調节系統的方程式, 可根据各环节的傳遞特性求得。在电动机轉速的微小範圍內, 所有各环节的傳遞特性均可认为是綫性的, 因此閉环系統的方程式就有可能用分析法求得。

求閉环系統的方程式时需利用式(3)、(6)、(10)、(11)及(17)。联解上述各式中的轉速, 便可导出下式

$$n = \frac{k_1 k_2 k_4 \frac{1}{c_e} U_1}{1 + \frac{k_1 k_2 k_3 k_5}{c_e}} - \frac{I_a R_a \frac{1}{c_e}}{1 + \frac{k_1 k_2 k_3 k_5}{c_e}} \quad (21)$$

式中第一项为电动机的理想空载轉速,它亦可用 n_0 表示。第二項的分子系电动机的靜轉速降,它在自动調节系統中并不存在,或者說只有在开环系統中才有此項。这一轉速降用 Δn_{pas} 表示。此外,还引用以下代号

$$K = \frac{k_1 k_2 k_3 k_5}{c_e} \quad (22)$$

系数 K 称为开环系統的总放大系数。它不仅能表征自动調节系統的静态精确度,而且在进行动态計算,特别是对确定超調和过渡过程時間时,更起着重要的作用。

考虑到所采用的各种代号,則式(21)可写成

$$\begin{aligned} n &= \frac{K}{1+K} \cdot \frac{k_4 U_1}{k_5 k_3} - \frac{I_a R_a}{c_e} \frac{1}{1+K} \\ &= n_0 - \frac{\Delta n_{\text{pas}}}{1+K} = n_0 - \Delta n_{\text{зам}} \end{aligned} \quad (23)$$

由式(21)和(23)所得出的第一个結論是,在閉环系統中,由于負載增加所引起的轉速降,將比开环系統小 $(1+K)$ 倍。

根据式(21)所作出的第二个結論是,放大系数愈大于1,則放大器的傳遞系数(k_1)及发电机或整流器的傳遞系数(k_2)的变化,对电动机轉速的影响亦愈小。当 $K \gg 1$ 时

$$n_0 \approx \frac{k_4 U_1}{k_5 k_3} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot \frac{U_1}{k_3} \quad (24)$$

由式(24)可見,当 $K = \infty$ 时,电动机的空載轉速將直接由标准电源的电压和測速发电机的傳遞系数来决定。由此显

而易見,为了精确地保持电动机的轉速,对系統中这两个元件的稳定性应有极高的要求(參閱第 2 章)。

現在我們来研究前面所指出的,改变轉速整定值的三种方法的优缺点。

如果总放大系数足够大,而且是可变的,則用移动标准电源电位計滑动触点的方法,改变 $R_2/(R_1+R_2)$ 之比,即可使空載轉速均匀改变,这在式(24)中是十分明显的。这时閉环系統的靜轉速降为

$$\Delta n_{\text{сам}} = \frac{\Delta n_{\text{пас}}}{1+K} \quad (25)$$

它近似与 K 成反比变化。由于改变 $R_2/(R_1+R_2)$ 之比,不仅会影响到 k_4 , 而且还将影响到 k_5 , 所以采用这种調节方法,可能会引起 K 及 $\Delta n_{\text{сам}}$ 产生某些变化。

如果只用电位計 (R_1 、 R_2) 調节,而測速发电机的最高电压亦不超过标准电源电压,則第二个电位計 (R_3 、 R_4) 可不必采用。这时

$$k_5 = \frac{R_{\text{BX}}}{R_{\text{BX}} + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (26)$$

式中, R_3 为測速发电机电樞回路的电阻。

当 k_5 表达式中的 $R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 項具有最大值时(即电位計的滑动触点在中間位置, $R_1 = R_2$ 时), k_5 及 K 的值最小。而当滑动触点位于两个极限位置时, k_5 及 K 的值最大。为了使 K 值在轉速范围的中間部分不致显著减小,电位計的全电阻 ($R_1 + R_2$) 应按这样选择,即使它小于放大器輸入端的电阻。在这种情况下, k_5 大致上为一常数,且只取决于反饋回路的电阻及放大器輸入端的电阻。如果 $R_3 \ll R_{\text{BX}}$, 則可认为