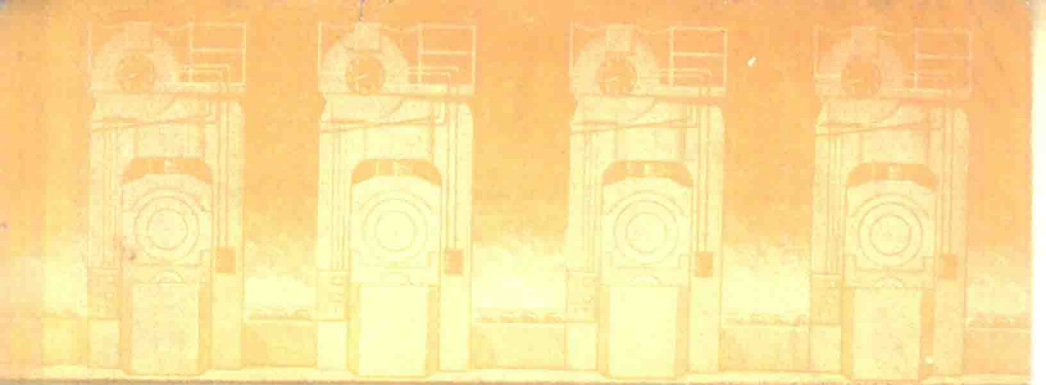




连续热轧机

电力拖动的调整



中国工业出版社

連續熱軋機電力拖動的調整

Ю.М.法因別爾格 著
А.Б.捷連諾夫
龐樹萱 朱暢宏 合譯
陳伯時 校

中國工業出版社

本书闡明連續熱軋机电力拖动調节系統的参数选择及工程計算方法，列举出决定上述系統原始参数的各种工艺因素。

特別注意到最新的可控水銀整流器控制系統調整問題及运行不正常的原因。

本书可供設計、調整及运行人員和冶金工厂實驗室工作人員之用。高等學校學生在学习电力拖动及調节原理課程时亦可利用之。

Ю.М.Файнберг А.В.Зеленов

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НЕПРЕРЫВНЫХ
СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Металлургиздат(Харьков 1956)

* * *

連續熱軋机电力拖动的調整

庞树萱 朱暢宏 合譯

陈伯时 校

*

冶金工业部图书編輯室編輯(北京鑄市大街78号)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路10号)

(北京市書刊出版事業許可証出字第110號)

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $75\frac{5}{8}$ ·插頁1·字数187,000

1962年3月北京第一版·1962年3月北京第一次印刷

印数0001—1,610·定价(10—7)1.30元

統一書号: 15165·1474(冶金—246)

目 录

原序.....	7
---------	---

第一篇 軋制过程的特性和对調节系統的要求

第一章 工艺过程的特点.....	10
§ 1. 控制連續軋机主傳动裝置的主要任务.....	10
§ 2. 軋輥的速度工作制及軋制方法.....	13
§ 3. 軋制时的速度关系.....	15
§ 4. 速度工作制与軋机調整方法的关系.....	16
§ 5. 确定調节規律的工艺因素.....	17
第二章 金屬帶張力軋制.....	19
§ 6. 热金屬的容許拉应力.....	19
§ 7. 热金屬的彈性系数.....	20
§ 8. 金屬在相鄰軋輥間的容許延伸.....	22
§ 9. 金屬前滑的影响.....	23
§ 10. 軋管时軋輥轉速的偏差.....	27
§ 11. 極限張力增長的时间.....	29
第三章 帶金屬环的軋制.....	30
§ 12. 环的容許值.....	30
§ 13. 型鋼环的計算.....	31
§ 14. 帶鋼环的計算.....	33

第二篇 調节綫路及其計算

第四章 各种主要型式調节系統的說明.....	36
§ 15. 基本的調节系統及其应用范围.....	36
§ 16. 炭阻式和电机式的調节器系統.....	39
§ 17. 电子-离子調节系統.....	48

§ 18. 由磁放大器供給电动机励磁的电子-离子系統.....	53
§ 19. 直接檢查金屬环的綫路.....	57
第五章 电子-离子調节系統的方程式	62
§ 20. 一般知識.....	62
§ 21. 电动机的方程式.....	64
§ 22. 归化的測速回路的方程式.....	67
§ 23. 电子放大器的方程式.....	68
§ 24. 柵極調节裝置的方程式.....	72
§ 25. 水銀整流器的方程式.....	73
§ 26. 調节系統总的微分方程式.....	74
§ 27. 微分方程式的古典积分法.....	78
第六章 調节系統穩定性的計算	83
§ 28. 列出系統的計算微分方程式的实例.....	83
§ 29. 电子-离子系統穩定性的校驗示例.....	89
第七章 調节过程的計算	92
§ 30. 关于繪制調节过程.....	92
§ 31. 特征方程式根的型式的确定.....	92
§ 32. 用洛巴切夫斯基法計算根的原理.....	94
§ 33. 特征方程式根的計算示例.....	99
§ 34. 調节过程中电动机轉速及負荷的計算.....	101
§ 35. 相鄰电动机的角位移的偏差.....	105
§ 36. 調节时所形成金屬环的計算.....	107
第八章 用运算法計算調节过程示例	110
§ 37. 一般知識.....	110
§ 38. 电子-离子系統方程式的运算子形式.....	110
§ 39. 穩定区域的計算.....	116
§ 40. 拉氏变换理論概述.....	120
§ 41. 系統微分方程式的变换.....	122

§ 42. 系統微分方程式的积分·····	125
§ 43. 利用拉氏變換的微分方程式积分示例·····	130
第九章 具有电机式調節器和炭阻式調節器的系統計算 ·····	133
§ 44. 具有可控水銀整流器的系統·····	133
§ 45. 發電機-电动机系統·····	145
§ 46. 帶有电动机輔助激磁機的系統·····	147
§ 47. 电动机激磁由电机放大机供电的系統·····	151
§ 48. 用电机式調節器保持电压恒定·····	153
§ 49. 用炭阻式調節器保持發電机电压恒定·····	155
§ 50. 自然調節过程·····	157

第三篇 調節系統的参数選擇

第十章 系統参数对調節过程的影响 ·····	160
§ 51. 調節过程的基本特性·····	160
§ 52. 电樞回路等值电阻的影响·····	163
§ 53. 电樞回路电感值的影响·····	167
§ 54. 拖动裝置轉动慣量大小的影响·····	170
§ 55. 电动机激磁磁通值的影响·····	172
§ 56. 稳定回路中电阻值的影响·····	173
§ 57. 稳定回路电容值的影响·····	177
§ 58. 速度調節系統参数選擇的总則·····	179
第十一章 自由金屬的状态对調節过程的影响 ·····	183
§ 59. 自由金屬在加力作用下的調節过程·····	183
§ 60. 帶張力下电动机靜負荷变化的計算·····	186

第四篇 調節系統的調整

第十二章 系統元件的調整 ·····	189
§ 61. 复杂調節系統調整工作的內容与特点·····	189
§ 62. 焊接式水銀整流器运行前的准备工作·····	190

§ 63.	柵極控制裝置的調整	194
§ 64.	自然調節過程	202
§ 65.	測速回路的參數調整	204
§ 66.	電子放大器的預調整	209
第十三章	系統工作狀態的調整	214
§ 67.	轉速偏差的測量	214
§ 68.	系統參數的預調整	219
§ 69.	起動狀態的調節	223
§ 70.	在給定轉速下調節過程的調整	226
第十四章	電子離子系統不正常工作的原因	233
§ 71.	系統電氣部分的故障	233
§ 72.	機械環節的故障	238
參考文獻		242

原 序

目前創造与推广連續軋机的自动控制及調節系統具有重大的实际意义。近年来帶有調節器的可控水銀整流器被实际应用在这些系統中，它們也开始在可逆軋机拖动裝置上使用。

軋机自动化的經驗提出了进一步改进自动控制及自动調節方法的任务。

馬格尼托哥爾斯克冶金企業在中央自动裝置實驗室参加下，于1947年初次实现«300»型鋼軋机的綜合自动化。这一工作促进了在各种不同用途的軋机上广泛推行工艺过程的自动化。

电力拖动公司的工程師們曾在1950年拟制了帶有电机式調節器的新綫路。

烏拉尔电器厂及其他工厂曾在1952~53年将电机式柵極調節器的可控水銀整流器成功地运用在寬帶鋼連續軋机上来代替变流机组。

1953~54年苏联的工厂在小型連續軋机的主傳动裝置及輔助机械上推行电子-离子控制和調節系統。

在战后时期，很多已在運轉的連續热轧机主傳动裝置是用炭阻式及电机式調節器来装备的，它們用来使母綫上电压保持恒定，并对电动机轉速的动态降落进行調節。几乎所有采用了的調節器都未作过整个系統动态品質的計算。工作状态是根据經驗来确定的。

为了更好的使用正在運轉着的自动裝置，以及为了設計及运用最新的系統起見，必須依据調節理論的一般原理。这在文献[26~30等]中已充分全面及系統的說明。

为了正确的選擇調節系統，并在運轉中使系統参数調整得最佳起見，必須克服由于軋制过程中某些因素在数量关系上的不一定所造成的困难。

目前关于軋制型鋼时金屬前滑的变化、金屬的張力及挤压力对于在軋制溫度範圍內金屬尺寸稳定性的影响、軋輥轉速对于所軋制金屬的尺寸、表面状态及其他性質的影响，关于这些都还没有足够数量的全面的实验資料。

为了解决这些問題，需要联合科学工作者和生产者——冶金工作者、金屬物理学家、机器制造人員和电气人員的力量。

在高等学校中學習普通調节原理刚刚开始不久，因此極大多數工程师不得不在实际工作过程中独立地去掌握它。

工艺过程和电力拖动的調节原理之專門性問題及应用問題都还研究得不够，这就加重了困难[27]。

目前还缺乏关于連續軋机自动化的电子-离子系統的具体应用的書籍。其中应闡明这些系統元件的工程計算方法、系統調整方法及其正常工作遭到破坏的原因的分析。

虽然有很多关于軋鋼机自动化問題の書籍[10,14,15,33,36,39,40等]，但許多实际工作中迫切提出的有关采用最新調节系統的問題还未得到反映。

本書目的是在于在某程度上弥补上述缺陷。在書中对于連續軋机热軋过程工艺特点的分析佔了很大篇幅，以作为給定調节系統原始参数的基础，同时也非常注意到最新电子-离子裝置的实际調整方法及其正常作用遭到破坏的原因的特征。

書中闡明最新調节系統主要参数的工程选择方法，具有詳細的数字例子，并給出几种方法的完整計算。

为了便于实际应用一些必要的数学及調节原理領域中的关系式，本書在方法上給出扼要的提示，这些提示对于完成計算已經够用。

在微分方程式的組成和求解的同时，使用了古典的数学方法和运算微积分的方法。在書中用数字例子表明的二种方法的一起使用，使讀者能迅速的掌握运算方法，并加快对計算正确性的校驗。

本書第一篇闡明軋制狀態的特性，並由此得出對調節系統的要求。

在第二篇內列舉典型的調節綫路圖及其說明，這裡還敘述一般的計算方法以及在給定系統的一定的參數時，校驗調整過程的穩定性及繪制調整過程的數字分析示例。

在第三篇內闡明參數變化對於調整過程的影響。在這基礎上，主要是確定系統中最昂貴的元件——軋鋼電動機的參數選擇的原則。

第四篇闡明應用鉚接式水銀整流器的電子-離子調節系統的調整問題。

本書中 § 16~19 和 44~49 是由技術科學副博士 А. Б. 捷連諾夫編寫的，其餘的材料為技術科學博士 Ю. М. 法因別爾格所寫。

作者向工程師 В. И. 克魯波維奇為協助組織試驗和理論工作，以及提出許多實際的建議表示謝意，這些工作已為本書所採用。作者還向工程師 П. И. 波波夫和 И. В. 加弗里洛夫致以謝意，他們在試驗工作方面給了我們寶貴的幫助，並提供一些調整問題的資料。

第 一 篇

軋制过程的特性和

对調节系統的要求

第一章 工艺过程的特点

§ 1. 控制連續軋机主傳动裝置的主要任务

在热軋机主机架上，金屬加工的主要任务是获得具有所需尺寸的断面及規定形狀的金屬。由于存在很多原因，能使軋件断面尺寸与規定的大小产生誤差。这些原因根据作用的性質可归結为两种主要类别[46]。

第一类因素引起軋件尺寸比在該孔型中最初所得到的有逐漸增大的誤差。例如軋机軸承的軸瓦、軋輥孔型及軋輥軸頸的磨損就屬於这一类。

切克馬列夫教授分析了在«300»精軋机架中，当速度为5米/秒时，直徑30毫米圓鋼的軋制情况，并且考虑磨損速度，得出在这种情况下軋輥調整的最大時間間隙为一小时的結論[46]。在这一类中还应当包括各軋鋼电动机轉速比的緩慢变化（与一根鋼的軋制週期相比較），它的發生譬如由于繞組逐漸發热及电气控制系統和調节系統的其他元件之参数逐漸改变。在第一类因素作用下，每一根后軋的鋼与前一根鋼尺寸的誤差实际上不大，而只是过了一些軋制週期才显示出誤差，它是每一根后軋的鋼的很小誤差累积的結果。

屬於第二类因素的，例如金屬溫度及化学成分的改变。在这些原因作用之下，所軋各鋼材間尺寸的誤差可能很大。溫度和化

学成分的改变,引起与前面所轧的金属尺寸有误差是间接的,它是通过在轧辊上金属压力的改变[47],因而轧机各部件(轧机架、轧辊、压下螺丝等)弹性变形改变[48]。轧钢电动机静态及动态的转速变化的影响也应属于这一类,每一轧制周期中,当金属进入轧辊和离开轧辊时,负荷大小的任何一点变化都会引起这种速度变化。这些电气机械过程往往不仅是轧件短尺的原因,而且还会使金属的完整性受到损坏。

当金属的化学成分及机械性能不变时,轧件尺寸的精确度取决于各种因素之综合,这些因素与轧机结构及其机架的配置、轧辊的孔型及其材料、轴承轴瓦的耐磨性、轧件的温度、速度和其他工艺条件、以及操作人员的技巧和熟练程度有关。轧制过程的正常进行和金属尺寸的精确度,在很大程度上决定于电气控制和调节系统诸元件的特性。连续式轧机的应用及其结构的改进、轧制速度的提高和金属在炉内加热过程的合理化、自动控制和调节装备更广泛的利用以及这些装备的改进,都提高了轧件的精确度。

各机架的轧辊采用单独的直流电动机转动,使得在轧制各种型钢和不同断面的情况下,易于获得所需要的轧辊转速和转速比。

在连续轧制的情况下,一根钢通常同时处在几个机架的轧辊中。现在我们来研究在连续作业线中的任意二相隣の机架:前机架为 i 号和后机架为 $i+1$ 号(圖1)。下面对属于二相隣の机架的所有各量都分別标以 i 和 $i+1$ 記号。相隣机架轧辊的转速 n_{oi} 和 n_{oi+1} 应当有这样的关系,即使得金属在离开前轧辊平面 A_1-A_1 与进入后轧辊平面 A_2-A_2 間之空間内,既不發生过多的积聚,亦不發生过分的金属張力。然而直流电动机的稳定转速与所克服的阻轉矩 M 有关。因此按照金属通过机架时期,已正确調整好了的二相隣の机架的转速比,一到金属离开轧辊时就要改变。电动机的这种角速度的偏差,当新的鋼錠进入轧辊时不会立即消失。

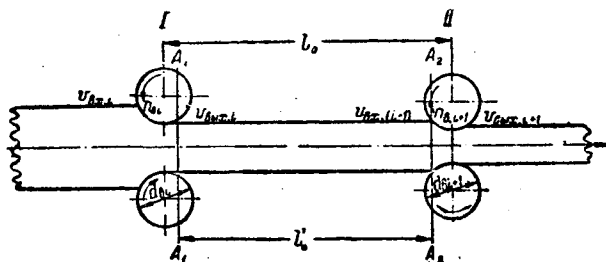


圖 1 連續軋机的二相橋式機架

I—i 号機架 (前機架); II—i+1 号機架 (后機架)

为了完成电动机从相当于空載轉矩 M_x 的轉速 n_x 到相当于电动机全負載轉矩 M_c 的轉速 n_y 值的过渡过程, 需要一定的時間間隔。

直流电动机在其負載改变时, 轉速达到稳定的过渡过程, 可能有振盪的或非週期性的特性。这一过渡过程的变化規律 (見 § 64), 基本上取决于电气回路的电阻和电感大小之比, 以及电动机和与电动机軸相联接的傳动裝置旋轉部分之机械慣性。

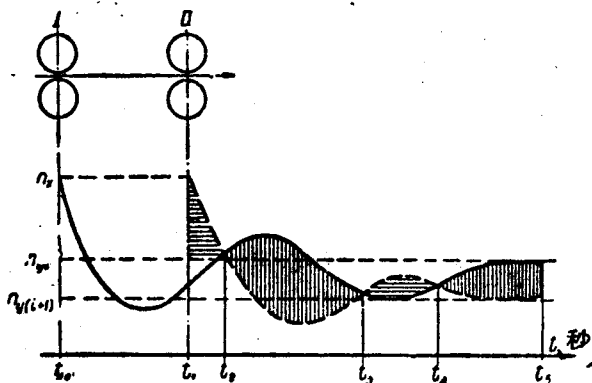


圖 2 二相橋式电动机轉速的变化

I—i 机架; II—i+1 机架

在具有振盪的过渡过程时，二相隣电动机轉速比的特性示于圖 2。

假定二电动机有同样的空載轉速 n_x ，但克服大小不同的阻轉矩，例如当 $M_{ci} < M_{c,i+1}$ 。在 t_0 瞬間軋輥咬入金屬后， i 号机架电动机的轉速發生趋向于稳定值 n_{yi} 的过渡过程。后机架电动机的轉速，由 t_1 瞬間（其軋輥咬入金屬时）起，發生同样的情况。此电动机按其阻轉矩值 $M_{c,i+1}$ 將有稳定轉速 $n_{y,i+1}$ ，較 i 号机架电动机的轉速为低。

在 $t_2 - t_1$ 段時間內，后机架 $i+1$ 号电动机的轉速高于前机架 i 号电动机的轉速。因而，在此时期內將造成二相隣軋輥之間的金屬有受到拉力的趋势。同样的趋势發生在 $t_4 - t_3$ 段時間內。相反地，在 $t_3 - t_2$ 及 $t_5 - t_4$ 时期內，后机架电动机的轉速低于前机架的电动机。这便导致金屬拉力的减少以及在相隣机架之間出現金屬积聚的趋向。倘若这种关系存在較長時間，那末金屬积聚將不断增長。

連續軋机主傳动控制裝置的主要功用是在軋制过程中建立并保持相隣の軋鋼电动机具有如此的轉速比，使得在机架間的金屬張力或在此空間中的金屬积聚不超过容許值，而与电动机負載的大小無關。

§ 2. 軋輥的速度工作制及軋制方法

为了闡明应当作为調节系統的設計及調整基础的要求，我們根据相隣軋輥之間金屬的狀態，来研究金屬、軋輥和电动机的速度关系。

从此观点出發，我們可以分成三种速度狀態：1) 自由軋制狀態，2) 挤压狀態，3) 拉伸狀態。为了正确地表明每一种狀態的性質，我們引入某些概念和量的定义。

在金屬离开前机架的 $A_1 - A_1$ 平面与其进入后机架的 $A_2 - A_2$ 平面之間的一段金屬（見圖 1），將称为金屬的“自由長度”或“自

由金屬”。

为了简化計算起見，金屬的自由長度假定是从二相隣軋輥軸綫之間測得的。因此自由長度 l 的最小值等于 l_0 (見圖 1)，超过二軋輥軸綫間距离 l_0 的自由金屬的积聚称为“环”。我們采用的名詞“环”与金屬积聚时的形狀無關。“环長” Δl 近似的理解为在二对相隣工作軋輥軸綫間的实际金屬長度 l 与軸綫間距离 l_0 之差值。

因此环長等于：

$$\Delta l = l - l_0, \quad (1)$$

在稳定的軋制过程中，相隣机架軋輥的轉速 n_{Bi} 和 $n_{B, i+1}$ 彼此并不相等。倘若在稳定的軋制过程中，当自由金屬既無張力亦無压力的情况下，金屬从前机架軋輥离开的速度 $v_{B \backslash X, i}$ 等于进入后机架軋輥的速度 $v_{B \backslash X, i+1}$ ，我們人为地認為二軋輥轉速 n_g 或二电动机轉速 n 是“相对相等”。对于相对相等时的速度符号，我們在上面加划，并稱它們为归化的速度。

因此，倘若在上述情况下金屬的速度相等 $v_{B \backslash X, i} = v_{B \backslash X, i+1}$ ，則归化的軋輥轉速相等 $\overline{n_{Bi}} = \overline{n_{B, i+1}}$ ，电动机的归化轉速亦相等 $\overline{n_i} = \overline{n_{i+1}}$ 。这种軋輥的和电动机的速度关系將称为“自由軋制状态”。

当轉速关系为 $\overline{n_{B, i+1}} > \overline{n_{Bi}}$ 时，称为“拉伸状态”。最后，倘若后机架軋輥归化的轉速低于前机架軋輥相应的轉速，即当 $\overline{n_{B, i+1}} < \overline{n_{Bi}}$ 时，則此速度关系称为“挤压状态”。在上述含义下归化速度的采用，使数台电动机的轉速在一起表示时能大大地简化，而且更加明显。这就極易于利用軋輥或电动机的轉速圖表来計算金屬的环長。

重要的是注意到在“拉伸状态”下自由金屬并不一定受到張力的作用，如同在“挤压状态”下可能并不存在压力一样。所采用的概念只表明軋輥的与电动机的瞬时的轉速关系，也就是說，它只确定速度的状态，而不是軋制过程进行的方法。倘若相当于挤压或拉伸状态的速度关系延續了一段时间，这段时间的長短亦取決

于金屬自由長度在前一段的狀態，則在這段時間內，將會真正發生張力或壓力。在金屬自由長度上存在壓力時的軋制過程稱為“帶擠壓力”軋制，如受張力作用，則這樣進行的過程名為“帶張力”軋制。

自由軋制速度狀態相對於自由軋制的工藝過程。倘若這時在機架間有一些金屬集聚，而在自由長度上的應力很小，與自由軋制的理想情況相比較，實際上並未引起各電動機負荷的重新分配，則這種工藝過程的進行方法同樣也叫做自由軋制。

§ 3. 軋制時的速度關係

現在我們確定在進入軋輥及離開軋輥時金屬運動的速度關係及這些速度與軋輥和電動機轉速的關係。在自由軋制狀態下，相鄰工作軋輥的相對轉速彼此相等，而金屬運動速度服從於這樣的規律：

$$v_{\text{БлX}, i} = v_{\text{BX}, i+1} \quad (1)$$

在擠壓狀態下，金屬離開前機架軋輥的速度 $v_{\text{БлX}, i}$ 高於金屬進入後機架軋輥的速度 $v_{\text{BX}, i+1}$ ：

$$v_{\text{БлX}, i} > v_{\text{BX}, i+1} \quad (2)$$

當軋輥和電動機的轉速關係稱為拉伸狀態時，金屬的運動可能有兩種速度關係。如果自由金屬沒有張力，則實際上金屬速度的關係為：

$$v_{\text{БлX}, i} < v_{\text{BX}, i+1} \quad (3)$$

倘若軋輥相對轉速的等式是在機架之間有金屬集聚而遭到破壞的時候，就發生這種情況。如果這種狀態存在足夠長的時間，則在環剛好被排盡時便出現金屬張力，金屬自前一對軋輥離開的速度 $v'_{\text{БлX}, i}(t)$ 開始變化，並將按趨向於 $v_{\text{BX}, i+1}$ 的大小而增長。

所以，當存在張力時金屬的速度關係將為：

$$v_{\text{БлX}, i} < v'_{\text{БлX}, i}(t) \rightarrow v_{\text{BX}, i+1} \quad (4)$$

式中 $v'_{\text{БлX}, i}(t)$ ——在有張力時金屬從前軋輥離開的速度。

因此，在“拉伸状态”下金属的环趋于减小或者产生金属张力。

按照圖 1 中的符号，对于自由軋制的情况可写成如下等式：

$$v_{\text{БВХ}, i+1} = v_{\text{БВХ}, i} \lambda_{i+1} \quad (5)$$

式中 λ_{i+1} ——在 $i+1$ 号机架的軋輥中金属的延伸率。

設 i 号及 $i+1$ 号机架有下述相应的符号： n_i, n_{i+1} ——电动机的轉速； i_i, i_{i+1} ——机架减速机的傳动比； $d_{\text{БВ}}, d_{\text{БВ}, i+1}$ ——軋輥的軋制直徑。

这样，在忽略金属的前滑时，对于金属从軋輥离开的速度能写成下列表达式：

$$v_{\text{БВХ}, i} = \frac{\pi d_{\text{БВ}} n_i}{60 i_i} \quad (6a)$$

$$v_{\text{БВХ}, i+1} = \frac{\pi d_{\text{БВ}, i+1} n_{i+1}}{60 i_{i+1}} \quad (6b)$$

考虑到等式(6a)及(6b)之后，按等式(5)的自由軋制条件变成：

$$\frac{d_{\text{БВ}, i+1} n_{i+1}}{i_{i+1}} = \frac{d_{\text{БВ}} n_i \cdot \lambda_{i+1}}{i_i} \quad (7)$$

当符合(7)式的条件时，則电动机相对轉速相等，即假如

$$n_{i+1} = \frac{d_{\text{БВ}} i_{i+1} \lambda_{i+1}}{d_{\text{БВ}, i+1} i_i} n \quad (9)$$

时，則有：

$$\overline{n}_{i+1} = \overline{n}_i \quad (8)$$

与此相应，假如軋輥的实际轉速具有下式的关系时：

$$n_{\text{БВ}, i+1} = \frac{d_{\text{БВ}} \lambda_{i+1} n_{\text{БВ}}}{d_{\text{БВ}, i+1}} \quad (11)$$

軋輥轉速即相对地相等：

$$\overline{n}_{\text{БВ}, i+1} = \overline{n}_{\text{БВ}} \quad (10)$$

§ 4. 速度工作制与軋机調整方法的关系

当操作人員或自动調节器对系統不加作用时，則在每一根新