

電力拖動自動控制

蘇聯專家 阿·依·舒金著

交通大學工業企業電氣化教研室

一九五四年十二月

電力拖動自動控制

蘇聯專家 阿·依·舒金著

交通大學工業企業電氣化教研室

一九五四年十二月

本書是蘇聯專家阿·依·舒金同志在交通大學講課時所用的講義，可作為工業企業電氣化專業四年制本科學生學習『電力拖動的自動控制』課時的主要參考書。全書由胡保生同志翻譯，但未經專家最後校閱，如有錯誤之處由譯者負責。

交通大學工業企業電氣化教研室

一九五四年十二月

緒 言

電力拖動的控制可瞭解為實現起動、制動、反向和轉速調節的過程，以及按照工藝過程的要求保持拖動的工作狀態。

在最簡單的電力拖動系統中，這些操作能藉助手控電器；如：閘刀、變阻器、各種開關器和其他類似的電器來實現。但是當頻繁的起動、停車和反向、或改變速度時，用手控方法操作的生產，耗費的時間多，因而機械的生產率低。

在電力拖動發展的第一個階段主要是應用非自動的控制，這時在電動機電路中的所有換接，都藉助手控的電器來進行。

電力拖動的進一步發展，以及對拖動的日益增長的要求，使得自動化電力拖動隨着電器和其他控制工具的改進，得到廣泛的擴展，而非自動的控制，則逐漸淘汰。

電力拖動的自動化，具有巨大的優點，因為它使得進一步提高勞動生產率、改善產品質量、減小電能消耗、而同時又提高工作中的可靠性成為可能。

在電力拖動自動化的條件下，能減小或完全消除工作人員個人特點對生產率和產品質量的影響，簡化對機器的照顧，減少工作人員的數量，創造工作機械遠距控制的可能性，保證生產操作執行的嚴格順序。

在蘇聯工業中，自動化電力拖動日益發展的運用，是開始於第一個五年計劃執行過程中，同時伴隨着亦發展了建立在俄羅斯調整理論經典作家路布諾夫(Ляпунов)、浮舒聶格臘斯基(Вышнеградский)、茹柯夫斯基(Жуковский)光榮傳統基礎上的自動調整理論。

蘇聯1951年—1955年發展國民經濟的五年計劃，亦規定着要在各種工業部門和繁重工作的機械化中、大規模地進行生產過程的自動化。

蘇聯工業生產技術上的普遍進步、和蘇聯學者與生產工作者的創造性的合作，保證着以高度的科學和技術水平來進行自動化的條件。

不應用自動化的電力拖動，則絕大部份工業生產過程的自動化是不可能想像的。

如果在第一個階段，電力拖動的應用僅僅限於相當簡單的手控電力拖動系統，那末，電力拖動技術的隨後發展，却與應用更複雜的自動系統有關。

在偉大的衛國戰爭年代，特別是在各個五年計劃執行的過程中，與繼電——接觸器控制的電力拖動系統的廣泛應用一起，開始更多地應用電機的和電子——離子的控制。

現代的自動化拖動系統往往是很複雜的裝置。

自動系統的複雜性首先由於增大工作的可靠性、生產率和準確性的嚴格要求、以及由這些系統所完成作用的多樣性所決定的。

在這些系統中，過渡歷程通常要以高次微分方程式來寫出。缺少解此種方程式的簡單數學工具，以及所提研究方法之繁複累贅，迫使人們去尋求不解微分方程式而進行過渡歷程研究的方法。

成功地工作在這個領域中的蘇聯學者庫列巴金（Кулебакин）、阿得羅諾夫（Андронов）、波波夫（Попов）、米海依洛夫（Михайлов）、蘇洛賓符尼可夫（Солодовников）等創造了在自動控制和調整理論方面許多新的科學方向，並且在許多問題上遠遠地超過了外國的學者。

自動調整和工業自動裝置理論的發展，創造了在工業和軍事技術中廣泛應用現代自動化電力拖動系統的條件，當設計和分析這種系統時，必須有調整理論的基本知識。

在工業自動化的許多情形中，按照工藝過程的條件，某一工作對象的幾個機件須要同步旋轉。

輪轉印刷機和軋管機的多電動機電力拖動、某些型式的金屬切削機床、吊橋橋架的電力拖動等，首先是屬於這一類的裝置。

在生產和運輸過程自動化的另一些情形中，尤其是在軍事技術中廣泛地應用着跟蹤電力拖動。

跟蹤拖動在步砲和對空射擊的控制中、在軍艦砲塔的穩定中、在按規定方向操縱船隻和飛機的裝置中、在無綫電定位設備（俗稱雷達）中、在仿模銑床中和在電力拖動工業與軍事應用的其他情況中得到特出的應用。

自動控制一年年越來越多地應用在動力事業、工業、運輸和國民經濟的其他部門中。

自動化通常可劃分為單獨自動化和複合自動化。當單獨自動化時，被控制的電力拖動與別的拖動沒有電的聯系。

當複合自動化時，在各別電力拖動間往往規定着電的聯系，以保證由這些拖動

所進行的嚴格操作順序。

造紙機、冶金工業的軋鋼機和其他巨型對象的自動控制系統，可以作為複合自動化的實例，在這些機器中須要精確和可靠地控制複雜的工藝過程。

蘇聯的一個冶金工廠早在 1938 年就實現了方坯初軋機的複合自動化。

現在，各種自動控制系統，其中包括複合自動化特別廣泛地應用在水利建築，電力站，化學工業、輕工業和食品工業以及冶金工廠中。

在機器製造工業中，控制的自動化基本上已普及到各別機床和組合機床上。

機械製造生產的某些特點，使得此種生產的複合自動化複雜起來。其中主要的特點是：產品品種、重量和尺寸的多樣性，零件的準確度，所加工材料的不同硬度，所製產品外型的複雜性。

但是最近十年來，在蘇聯的機器製造工業中，於組合機床和自動流水綫的創造和掌握方面，得到很大的成就。

這些成就使得在複合自動化的領域中，能轉向解決更複雜的問題。

在蘇聯共產黨第十九次代表大會上，Г. М. 馬林科夫同志曾指示過：「……必須堅決根除在利用我們現有豐富技術方面的缺點，必須堅決實現生產過程的全部機械化和自動化的計劃，必須在國民經濟一切部門更廣泛地應用最新的科學和技術成就，必須不斷改進勞動和生產的組織形式和方法，必須更好地使用勞動力。」

自動裝置的廣泛運用是由社會主義的基本規律所規定，而它的基本特點和要求可歸結為在高度的技術基礎上，藉助社會主義生產不斷的增長和改進，來保證最大地滿足一直增長着的整個社會的物質和文化需要。

現在，在許多機器製造工廠中，早已廣泛地採用着自動流水綫。它們很成功地應用在蘇聯的拖拉機工廠、汽車廠和其他工廠中。

完全自動化的麵包廠，生產水泥的工廠和世界上第一個生產汽車活塞的自動工廠已經建造起來，並開始運用。

活塞工廠由兩條同樣的生產綫組成。每一條綫完成着整個由毛坯的鑄造開始，到成品的貼商標和包裝為止的複雜操作。一條綫製造着“ЗИС-150”汽車的活塞，另一條製造着“ТАЗ-АА”汽車的活塞。

這兩條綫設計得都能夠調整到製造任一型式的活塞，既能製造標準尺寸的，又能製造修配用尺寸的活塞。

整個工廠生產着十一種型式的活塞，其中為載重汽車“ЗИС-150”用的有四種

(一種標準的和三種修配用的尺寸)，而為載重自動機“ГАЗ-АА”用的有七種(一種標準的和六種修配用的尺寸)。

這個工廠中許多數量的各種不同機組，和它們在工作中嚴格同步的必要性，要求有靈敏的、精確的和可靠的控制系統。應該着重指出：當工廠一分鐘時間的工作，要發出 5000 多次不同的命令。

在這個自動化工廠中所採用的液電自動控制系統(Гидроэлектрическая система автоматического управления)完全能保證實現對該工廠所提出的要求。

絕大部份的命令和各種信號是由電器、時間繼電器、終端開關器、和具有液力分配裝置的繼電器來發出。純粹機械控制系統的應用是很有限的。

將這些綫的裝備稍加改變，可以調整到製造在大小和尺寸上相似於原生產活塞的，其他構造的活塞。

將這個工廠與具有高生產率裝備和工藝過程很好的莫斯科汽車工廠(ЗИС分廠)相比較，可以下列指標來表明：工人的總數減少 76,2%、調整員和操作工人減少 81%、其中操作工人減少 93,75%、勞動力縮減 81%、生產週期縮短 50%。

從這個工廠的例子，能很好地看出，自動化過程的實施很急劇地改善着生產的技術經濟指標。當工廠創立時，在理論上和實際上解決着由個別機械的單獨自動化轉向生產複合自動化的任務，這個任務是工藝過程組織的最高形式。

學者、工程師和生產革新者的創造性合作，是在國民經濟其他部門中進一步擴大複合自動化的保證。

在大多數情形下，生產自動化，尤其是複合自動化，一般都要以應用電力拖動及電力拖動的自動控制為基礎。

現代的電力拖動自動控制系統是很複雜的裝置，由各種電機、電器、電子——離子自動裝置的組件來組成，它們的正確相互作用往往用複雜的控制綫路來保證。

電力拖動的自動控制，可以在繼電——接觸電器、電機自動裝置和電子——離子電器的基礎上來實現。

繼電——接觸器的自動裝置，已得到最廣泛的普遍應用。但是，現在其他型式的控制，特別是電機的控制(Электромашинное управление)亦相當廣泛地應用着。

工作在工業企業電氣化部門中的工程師，一定會碰到非常多樣化的電力拖動自動控制系統。但是它們的絕大部份，是建立在一定的原則和原理的基礎上的，不學

習這些原理和原則，則不可能正確地設計、研究和運用現代的自動化電力拖動系統。

本課程即致力於研究這些原則和原理，以及討論某些最常用的電力拖動控制系統。

電力拖動的自動控制

內 容

緒 言

第一章 基本知識。自動控制系統的元件

1. 基本概念和定義..... 1
2. 電力拖動自動控制的形式..... 4
3. 對控制綫路所提出的要求..... 5
4. 控制綫路的主要電路和習用符號..... 7
5. 設計自動化電力拖動綫路的某些特點..... 10
6. 過渡歷程中電動機電流和轉矩巔峯值的限制..... 15
7. 供直流電動機接入起動電阻和加速接觸器用的綫路..... 16
8. 供感應電動機接入起動電阻和加速接觸器用的綫路..... 18

第二章 電動機自動起動的原則

9. 反電勢原則..... 20
10. 電流原則..... 22
11. 時間原則..... 24
12. 頻率原則..... 28
13. 控制原則的比較..... 29
14. 自動控制原則的選擇..... 30

第三章 自動制動的原則

15. 發電制動（再生制動）..... 33
16. 直流電動機時的反接原則..... 33
17. 感應電動機時的反接原則..... 38
18. 能耗制動（動力制動）..... 41
19. 制動原則的比較和選擇..... 45

第四章 自動化電力拖動線路的保護

20. 保護的功用和分類	48
21. 短路電流的保護	49
22. 熱保護	50
23. 最大電流的保護	51
24. 零（無壓）保護和最小保護	53
25. 限制所須功率的保護	54
26. 完成保護作用的裝置和連鎖電路	55

第五章 直流和交流電動機的繼電—接觸器控制

27. 綫路的某些典型環節（Узлы）和電路	60
28. 鼠籠式感應電動機的控制綫路	70
29. 多速感應電動機的控制	77
30. 綫繞轉子式感應電動機的控制綫路	80
31. 直流電動機的控制綫路	85
32. 發電機——電動機系統電力拖動的原理綫路	96
33. 發電機——電動機系統〔控制器〕控制綫路	101
34. 發電機——電動機系統可調節拖動的按鈕自動控制綫路	103
35. 小功率（容量）和具有廣大調速範圍的發電機——電動機系統的控制綫路	106
36. 串激的發電機——電動機系統	107
37. 發電機——電動機系統的應用範圍	108
38. 同步電動機的控制原則	109
39. 直接起動時同步電動機的控制綫路	122
40. 大容量高壓同步電動機的控制綫路	124
41. 具有直接聯接激磁機的同步電動機起動綫路	128

第六章 電機的控制（用電機放大器的控制）

42. 一般知識	130
43. 正交磁場電機放大器（橫磁場電機放大器）	131
44. 具有正交磁場電機放大器的控制綫路	134

45. 自激電機放大器和控制綫路	141
46. 電機控制系統的應用範圍	145
第七章 應用磁性放大器的自動控制和調整的系統	
47. 磁性放大器的作用原理和性能	148
48. 磁性放大器的參數及它們的計算	150
49. 具有磁性放大器的控制綫路	153
50. 磁性放大器系統的應用範圍	157
第八章 電子——離子的自動控制和調整系統	
51. 導言	159
52. 電子——離子系統的元件	160
53. 柵控裝置	162
54. 電子——離子自動控制和調整系統的環節和綫路	166
55. 電子——離子控制系統的特點	174
56. 電子——離子自動控制和調整系統的應用範圍	175

第一章

基本知識。自動控制系統的元件

§ 1. 基本概念和定義

現代的電力拖動自動控制與完成各種十分不同的操作相關聯，下面是屬於它們的主要操作：1) 電動機的起動，2) 調節速度，3) 反向，4) 電的制動，5) 電動機和被拖動機械免除各種過載和事故的保護，6) 系統狀態的信號，7) 實現一定的操作順序，8) 自動保持電力拖動的速度和其他參數為恆值。

要根據對工作機械所提出的生產要求、所採用的電力拖動系統和控制的自動化程度，來決定在一個綫路中應將那些操作結合起來。對系統所提出的要求越是多樣和複雜，自動控制的綫路照例也越複雜。

但是綫路的複雜化，往往由自動化電力拖動所特有的優點，首先是生產率的提高和生產過程完成的高度準確性來作了補償。

自動控制和調整是自動化的基本形式。自動控制所指的是：在人的參加下，保證工藝過程合理地進行，保證機械各別機件所須的移動，或生產機組和其他被控對象工作狀態的調節。

自動調整可瞭解為比自動控制更複雜的自動化形式。

在自動調整下，要保證某種被調整參數的穩定或嚴格地保持為恆值，而沒有人的參加。這些被調整的參數例如是電動機的轉速、壓力、溫度或工藝過程中應當調整的其他因素。

使工藝的某些因素按預定規律而變動的調整、亦屬於自動調整，並可稱為程序自動調整。（программное автоматическое регулирование）。

自動調整廣泛地應用於現代的技術中，尤其是在下列情況：熱力設備中燃燒的調整、發電機電壓的調整、機床上工件按模型的仿模加工、巨大軍艦砲塔的穩定等等。

在上述的各種過程中，往往要求保持被調整因數值的高度準確性。

所以，自動調整是比自動控制更為複雜和準確的過程，並須要有檢測和計算被調整參數的狀態，及按照它來修正調整過程的某一感覺元件（чувствительный элемент）為其前提的。

由上述自動化基本形式的比較，可得出自動控制綫路和自動調整綫路的可作為特徵的區別。

自動控制綫路，按它的結構來說，是開迴的系統，即在綫路中，被調節的因素不再作用到控制的本身系統上。

電力拖動控制開迴系統的結構圖表示在圖 1-1 上。

絕大多數簡單的，多半是不調整的工業電力拖動，都是建立在開迴控制系統的原理上。

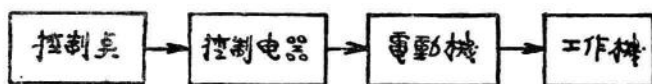


圖 1-1. 電力拖動開迴控制系統的結構圖

反之，自動調整系統是閉迴的系統，因為在其中被調整的因素不斷地再作用到調整系統上。

調整閉迴系統的結構圖表明在圖 1-2 上。

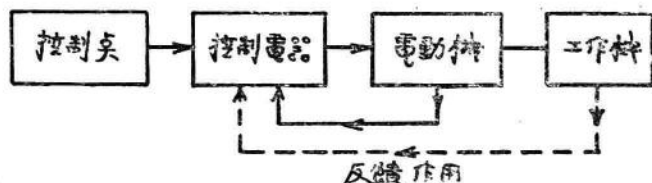


圖 1-2. 自動調整閉迴控制系統的結構圖

企圖加速生產過程，同時提高產品質量以及更嚴格地要求自動化對象工作的可靠性，引起了去設計和運用更複雜的自動化電力拖動系統。

在這一類的電力拖動自動控制綫路中，施着附加的連鎖電路、自動檢測和調整的元件和其他必要的裝置。例如：在按發電機——電動機系統工作的初軋機電力拖動中，應用着限制電動機電流的自動調整器，以保證電動機本身和整個裝備的有效利用。此外，還應用着電壓自動調整器，以保證發電機電壓的必要恆值，因而亦

保證了所需要的工作速度。

仿模銑床的控制系統附有跟蹤系統 (сле́дящие системы)，它跟隨着模型來保證切削刀具的縱向、橫向和垂直方向進給運動所需要的規律。

自動控制系統較早就應用在龍門鉋床上。在現代的龍門鉋床電力拖動中，爲了要提高機床的利用率、加速工件的加工過程及減少電能消耗，已開始應用自動控制和調整的複合綫路。

在往往由十個以上電動機組成的造紙機多電動機拖動中，爲了保持機器各別組件的恆定轉速，每個電動機的控制綫路都裝有自動調整器。

當在自動化電力拖動系統中應用電機放大器和電子——離子放大器時，這種系統在某些階段作爲自動控制系統工作，而在另一些階段則作爲實現極精確調整的自動調整系統而工作。

所舉的例子說明，在複雜的拖動中，控制作用可以與調整和檢測的作用相結合起來。

因此，電力拖動自動控制系統可瞭解爲能藉助控制、檢測和調整的操作、保證得到規定過程的裝置。

在各種不同組合的自動化系統中，往往可碰到下列主要元件：

1. 各種類型的電機。
2. 各種不同的接觸器。
3. 各種型式和構造的繼電器。
4. 起動、制動和調速用的電阻。
5. 按鈕站。
6. 主控器（或稱主令控制器）。
7. 行程和終端開關器。
8. 保護用的電器。
9. 電氣機械制動器。
10. 各種換流器和整流器。
11. 檢測儀器。
12. 各種型式和用途的調整器。

上面所指各元件的利用程度和它們在每一個電力拖動中的組合，首先是由拖動的用途，對拖動所提出的要求，和技術——經濟的條件來決定的。

§2. 電力拖動自動控制的形式

自動控制可劃分為兩種主要的形式：斷續的和連續的。

斷續控制是參數的控制，因為在這種場合電力拖動工作狀態的改變，是藉助綫路參數變動的方法來進行，例如，變動加在綫路中的電阻值。

為了與斷續控制區別起見，連續控制可稱之為補償的控制（компенсационное управление），因為在這種情形下，工作狀態的改變，是依靠一個控制電路作用到另一控制電路的綫路工作的補償來達到的。

自動化電力拖動系統從原理結構和控制形式的觀點來看，可劃分為下列幾類：

1. 斷續動作的系統或繼電——接觸器控制系統。
2. 具有電機控制（註：有電機放大器的）的連續作用系統。
3. 具有電子——離子控制的連續作用系統。
4. 混合的控制系統。

以接觸器和繼電器的接入和換接，來保證拖動運動過程進行的系統，是屬於繼電——接觸器控制的系統。

當此種形式的控制時，例如，直流電動機的起動是以相應的接觸器短接各別起動電阻段的方法來進行，並且電動機電流按節級式曲綫 $-A$ （圖2-1）變動着。顯然，具有繼電——接觸器控制的類似電力拖動是斷續作用的拖動。

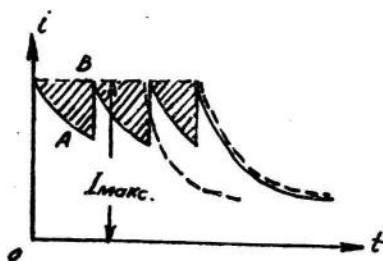


圖2-1. 起動時電動機電流的變化， A
當繼電——接觸器控制時， B
當連續控制時。

以有時起自動調整器作用的特種電機，來保證控制和調整的系統是屬於具有電機控制的系統。

在具有電子——離子控制的系統中，控制和調整是藉助電子——離子儀器（電子管、閘流管，引燃管、水銀整流器）來進行。

與第一類的控制系統不同，具有電機和電子——離子控制的系統往往是連續作用的系統。這種系統在電動機起動的加速

過程中，能得到按曲綫 B 的電流變化，即大致是直流 $I = I_{max}$ 的變化，這樣電力拖動在更短的時間內達到所需要的速度。

在一定的時間間隔內，連續控制和斷續控制圖形間的蔭影面積，等於差數 $\int I_{\max} dt - \int I dt$ ，即安培小時。將它乘上電壓，我們可以得到當斷續控制和連續控制相比較時，在起動加速過程中少供給電動機的能量。

這個情況，在為時常起動和反向的拖動選擇控制形式時，需要特別地考慮到。

上述的優點，並結合連續控制的高度準確性，保證了連續控制系統的廣泛應用，特別是用在具有複雜工作紀錄圖的被調整電力拖動中，以及重複——短時運用的拖動中。

以某種程度聯合上述控制形式的電力拖動，是屬於混合控制的系統。

這就是說後一種的系統，是建築在前面三種控制形式基礎上的，後面更詳細地來研究。

§ 3. 對控制綫路所提出的要求

爲了實現對電力拖動所提出的條件和要求，自動控制綫路應滿足下列的基本要求：

1. 最大地符合於工藝的任務。
2. 工作的順序性和準確性。
3. 簡單和經濟。
4. 控制的便利和管理的簡單。
5. 工作的可靠性。
6. 組成綫路的元件和電器的適當利用。
7. 事故情況時的安全。

按照第一個要求，自動控制綫路應該以規定的操作順序和所需要的速度，保證實現對該電力拖動所提出的全部技術條件。

絕大部份的自動控制綫路，按照這個要求，應該保證起動、反向和制動的應有過程的進行，轉速調節的一定範圍和平滑性，按已定規律調節轉矩或轉速，和當事故狀態時必要的保護。當更複雜的要求和對電力拖動附加地提出條件時，控制綫路由於要完成下列的附加操作而複雜起來，如要保證：工作機械各別部份和組件運動的相互配合，工作週期（循環）的自動化、事故預告信號以及其他的特殊要求。

按照第二個要求，綫路應該保證各組成綫路的元件和環節有必要的工作順序和工作準確性，並且它們是由下列的基本因素來決定的：

1. 當加電壓到綫路上時，電器和其他組成綫路的元件動作的正確性。
2. 慣性落後和非綫性滯後的最小影響。
3. 各別元件和整個綫路工作所必須的順序。
4. 連鎖電路工作的正確性。
5. 當導綫拉斷和個別電器損壞時，綫路工作順序沒有破壞的可能性，否則它可能造成工作人員的殘廢，產品的毀壞和生產機械的故障。

簡單和經濟是每個自動控制綫路的最重要指標，並且由下列主要的指標來決

和環節的數量，以及它們的複雜性。

1. 接觸器、繼電器、換接開關和其他電器的連鎖觸頭數。

3. 聯接導綫的數量和長度。
4. 組成綫路的元件和環節的劃一程度。

控制的便利和管理的簡單是主要的指標，並由下列條件來決定：

1. 控制機構操作的簡單和便利。
2. 迅速和方便地由一種控制形式轉向另一種形式的可能性。
3. 按操作人員的願望，得到各種不同拖動狀態的可能性，譬如：在順向時以及倒向時拖動的不同速度，拖動在路程的不同位置上停車等等。
4. 藉助一個主控器將工作機械各別電器和一定環節作分別控制及共同控制的可能性。
5. 電力拖動按一定順序進行工作的可能性。
6. 迅速地將綫路從損壞的控制板換接到備用的控制板上。

綫路工作的可靠性是最重要的要求之一，並由下列條件決定：

1. 綫路中所用元件的可靠性。
2. 電綫的可靠性。
3. 保護綫路的裝備和元件免除外界的影響。
4. 無帶有大量觸頭的複雜連鎖電路。
5. 保護電器工作的精確性。

組成綫路的元件和電器的適當利用，是由正確的計算來決定的：

1. 主觸頭和連鎖觸頭的開斷功率。
2. 電器接入的許可次數。