

頻率法自動調節理論

[蘇聯] Н. Т. 庫佐夫柯夫 著



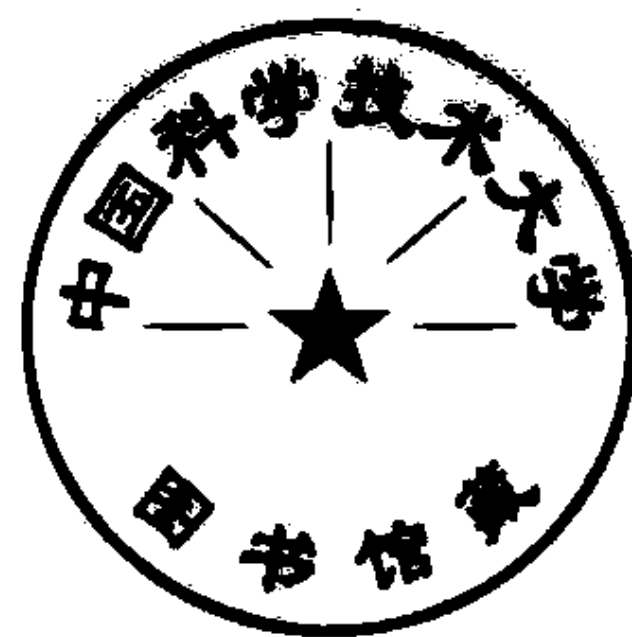
國防工業出版社

73.823
435

頻率法自动調節理論

〔苏联〕H. T. 庫佐夫柯夫 著

張明華 譯



國防科技出版社

1986.9

內 容 提 要

本书討論了用常系数和变系数微分方程式描述的随动系统和自动調节系統的分析 and 綜合的頻率法，以及根据广义頻率特性和对数根軌迹图綜合这些系統的方法。

本书适用于从事自动調节的工程技術人員，以及有关专业的大学生。

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, ОСНОВАННАЯ НА ЧАСТОТНЫХ МЕТОДАХ

〔苏联〕 Н. Т. Кузовков

ОБОРОНГИЗ 1960

*

頻 率 法 自 动 調 节 理 論

張 明 華 譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 14 $\frac{3}{4}$ 328 千字

1966 年 4 月第一版 1966 年 4 月第一次印刷 印数：0,001—2,800册

統一書号：15034·1106 定价：（科六）2.20 元

第二版原序(节譯)

本书第二版与第一版的区别是更充分地討論了頻率分析，并从这个分析的角度出发論述了調节領域中某些卓越成果。在包含有新內容的各章中首先必須指出：在第八、第九章中討論了广义頻率分析，在第十章中討論了研究变参数綫性系統的工程方法。

本书的中心仍旧是頻率法。頻率法是由計算电力通信系統稳态过程的方法中轉入自动調节理論中来的，它可以认为是現代調节理論的主要研究方法。在最近拟定的返回到按根分布（根軌迹图）研究閉环系統性能的趋势，不仅沒有减小、反而增加了頻率法的意义，因为用这个方法來繪制根軌迹图最为簡單（第八章第三节）。

如同第一版一样，本书是基于用最簡單的数学工具（常系数微分方程式和拉普拉斯变换）来讲述的。只是在第七章第三节和第四节中討論按实验过程确定傳遞函数时，采用了矩陣运算，但是这里只指出了它的运算規則。

本书适用于从事随动系統和自动調节系統設計的工程技术人員。因此本书主要的不是証实調节理論的各个基本概念，而是指明它們在具体計算时的应用。因此本书中包含了大量的参考資料（古尔維茨稳定判据、代数方程式的解等）。对于自动調节系統方程式的列写方法也給予了很大的注意。

目 录

第二版原序	6
第一章 自动调节系统的一般概念	7
第一节 按开环和闭环工作的系统	7
第二节 关于稳定性的概念	11
第三节 列写微分方程式的方法	13
第四节 列写在给定航向上锁定飞机的系统方程式	14
第五节 列写随动系统的方程式	17
第六节 列写蒸汽机转速调节系统方程式	22
第七节 列写动力陀螺稳定器方程式	33
第八节 过渡过程。稳定条件	45
第九节 有差和无差调节	51
第十节 静特性	53
第二章 结构图的拟制和变换	57
第一节 拟制结构图的方法	58
第二节 多回路结构图	61
第三节 结构图的等值变换	63
第四节 有差系统和无差系统的结构图	67
第五节 组成环节传递函数的基本因子	72
第三章 稳定判据	80
第一节 古尔维茨稳定条件	81
第二节 米哈依洛夫稳定判据	83
第三节 单回路系统的幅相稳定判据	84
第四节 幅频特性和相频特性	98
第五节 确定频率特性的实验方法。矩形波方法	101
第六节 开环系统频率特性曲线举例	104
第七节 相位和模数的稳定储备	109
第八节 具有纯滞后的系统	110
第九节 用幅相判据研究多回路系统的稳定性	114
第十节 M 和 N 圆列线图	116
第四章 对数频率特性法	121
第一节 对数幅频特性和相频特性	121

08581

第二节	基本因子的对数频率特性。样板	123
第三节	开环单回路系统对数频率特性的绘制	138
第四节	幅频特性和相频特性之间的联系	144
第五节	按对数频率特性确定稳定储备	146
第六节	使系统闭合用的列线图	148
第七节	用对数频率特性法研究多回路系统的稳定性	155
第八节	复杂函数对数频率特性的绘制	160
第五章	稳定状态下的准确度	163
第一节	输入信号和输出信号间的一般关系	163
第二节	随动系统的误差系数	172
第三节	误差系数和系统积分环节数目的关系	175
第四节	减小稳态误差的补偿法	184
第五节	在闭合回路中引入补偿环节以减小稳态误差	185
第六节	复合系统	190
第七节	带有选择反馈的随动系统	193
第六章	过渡过程	198
第一节	用过渡过程的拉普拉斯象函数展成简单分式的方法来确定过渡过程	200
第二节	按开环系统的渐近对数幅频特性确定闭环系统的根	202
第三节	利用列线图确定三阶方程式的根	210
第四节	按开环系统渐近对数幅频特性确定根的例子	216
第五节	按半对数实频特性绘制过渡过程	219
第六节	利用透明样板绘制过渡过程	227
第七节	按系统的频率特性估计过渡函数的主要指标	237
第七章	根据实验数据确定频率特性和传递函数	251
第一节	根据起动曲线确定环节的幅频和相频特性的分析法	251
第二节	利用透明样板按起动曲线确定对象的频率特性	258
第三节	用最小平方法按输入和输出信号的示波图确定传递函数	263
第四节	利用积分矩阵确定传递函数的系数	271
第八章	广义频率分析	279
第一节	广义频率分析的基本概念	279
第二节	利用广义频率分析确定代数方程和超越方程的根	292
第三节	对数根轨迹图	302

第四节	按閉环系統的漸近对数幅頻特性繪制过渡函数	311
第五节	在帶有单位反饋的系統中过渡函数的繪制	327
第六节	按閉环系統的漸近对数幅頻特性繪制过渡函数的例子 ...	328
第七节	当輸入訊号为脉冲、綫性函数和拋物綫时，按閉环 系統漸近对数幅頻特性繪制过渡过程	335
第八节	各种根对过渡过程曲綫的相对影响	344
第九章	鎮定和綜合方法	345
第一节	借粘性摩擦鎮定	347
第二节	依靠引入失調量的导数来实现鎮定	349
第三节	借微分迴路鎮定	354
第四节	借积分迴路鎮定	358
第五节	借积分-微分迴路鎮定	362
第六节	借內反饋鎮定	365
第七节	按給定要求綜合随动系統的串联校正迴路	375
第八节	单迴路系統中，对主反饋迴路中引入的校正环节的綜合	380
第九节	內部反饋的綜合	390
第十章	变参数綫性系統	398
第一节	系数冻结法	398
第二节	对二阶綫性变参数系統的李亚普諾夫稳定性的充分条件	400
第三节	利用古尔維茨判据研究无限长時間內变参数 系統的稳定性	402
第四节	将变参数系統变换为《恒定》系統时自变量的置換	403
第五节	自变量置換法的准确度	411
第六节	繪制变参数系統傳遞函数的近似方法	415
第七节	系数作綫性变化的一阶环节的精确傳遞函数和結構图 ...	423
第八节	具有一个可变环节的系統稳定性和品质的研究	426
第九节	在常参数和变参数綫性系統中偏差的积累	430
附录		438
附录 I	代数方程式的解	438
附录 II	运算微积的基本公式	442
附录 III	将輸出訊号分解为三个分量的公式的推导	444
附录 IV	样板和列綫图	448
参考文献		457

73.823
435

頻率法自動調節理論

〔苏联〕H. T. 庫佐夫柯夫 著

張明華 譯



國防1986出版社

1986.9.6

內 容 提 要

本书討論了用常系数和变系数微分方程式描述的随动系统和自动調节系統的分析 and 綜合的頻率法，以及根据广义頻率特性和对数根軌迹图綜合这些系統的方法。

本书适用于从事自动調节的工程技術人員，以及有关专业的大学生。

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, ОСНОВАННАЯ НА ЧАСТОТНЫХ МЕТОДАХ

〔苏联〕 Н. Т. Кузовков

ОБОРОНГИЗ 1960

*

頻 率 法 自 动 調 节 理 論

張 明 華 譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 14 $\frac{3}{4}$ 328 千字

1966 年 4 月第一版 1966 年 4 月第一次印刷 印数：0,001—2,800册

統一書号：15034·1106 定价：（科六）2.20 元

目 录

第二版原序	6
第一章 自动调节系统的一般概念	7
第一节 按开环和闭环工作的系统	7
第二节 关于稳定性的概念	11
第三节 列写微分方程式的方法	13
第四节 列写在给定航向上锁定飞机的系统方程式	14
第五节 列写随动系统的方程式	17
第六节 列写蒸汽机转速调节系统方程式	22
第七节 列写动力陀螺稳定器方程式	33
第八节 过渡过程。稳定条件	45
第九节 有差和无差调节	51
第十节 静特性	53
第二章 结构图的拟制和变换	57
第一节 拟制结构图的方法	58
第二节 多回路结构图	61
第三节 结构图的等值变换	63
第四节 有差系统和无差系统的结构图	67
第五节 组成环节传递函数的基本因子	72
第三章 稳定判据	80
第一节 古尔维茨稳定条件	81
第二节 米哈依洛夫稳定判据	83
第三节 单回路系统的幅相稳定判据	84
第四节 幅频特性和相频特性	98
第五节 确定频率特性的实验方法。矩形波方法	101
第六节 开环系统频率特性曲线举例	104
第七节 相位和模数的稳定储备	109
第八节 具有纯滞后的系统	110
第九节 用幅相判据研究多回路系统的稳定性	114
第十节 M 和 N 圆列线图	116
第四章 对数频率特性法	121
第一节 对数幅频特性和相频特性	121

08581

第二节	基本因子的对数频率特性。样板	123
第三节	开环单回路系统对数频率特性的绘制	138
第四节	幅频特性和相频特性之间的联系	144
第五节	按对数频率特性确定稳定储备	146
第六节	使系统闭合用的列线图	148
第七节	用对数频率特性法研究多回路系统的稳定性	155
第八节	复杂函数对数频率特性的绘制	160
第五章	稳定状态下的准确度	163
第一节	输入信号和输出信号间的一般关系	163
第二节	随动系统的误差系数	172
第三节	误差系数和系统积分环节数目的关系	175
第四节	减小稳态误差的补偿法	184
第五节	在闭合回路中引入补偿环节以减小稳态误差	185
第六节	复合系统	190
第七节	带有选择反馈的随动系统	193
第六章	过渡过程	198
第一节	用过渡过程的拉普拉斯象函数展成简单分式的方法来确定过渡过程	200
第二节	按开环系统的渐近对数幅频特性确定闭环系统的根	202
第三节	利用列线图确定三阶方程式的根	210
第四节	按开环系统渐近对数幅频特性确定根的例子	216
第五节	按半对数实频特性绘制过渡过程	219
第六节	利用透明样板绘制过渡过程	227
第七节	按系统的频率特性估计过渡函数的主要指标	237
第七章	根据实验数据确定频率特性和传递函数	251
第一节	根据起动曲线确定环节的幅频和相频特性的分析法	251
第二节	利用透明样板按起动曲线确定对象的频率特性	258
第三节	用最小平方法按输入和输出信号的示波图确定传递函数	263
第四节	利用积分矩阵确定传递函数的系数	271
第八章	广义频率分析	279
第一节	广义频率分析的基本概念	279
第二节	利用广义频率分析确定代数方程和超越方程的根	292
第三节	对数根轨迹图	302

第四节	按閉环系統的漸近对数幅頻特性繪制过渡函数	311
第五节	在帶有单位反饋的系統中过渡函数的繪制	327
第六节	按閉环系統的漸近对数幅頻特性繪制过渡函数的例子 ...	328
第七节	当輸入訊号为脉冲、綫性函数和拋物綫时，按閉环 系統漸近对数幅頻特性繪制过渡过程	335
第八节	各种根对过渡过程曲綫的相对影响	344
第九章	鎮定和綜合方法	345
第一节	借粘性摩擦鎮定	347
第二节	依靠引入失調量的导数来实现鎮定	349
第三节	借微分迴路鎮定	354
第四节	借积分迴路鎮定	358
第五节	借积分-微分迴路鎮定	362
第六节	借內反饋鎮定	365
第七节	按給定要求綜合随动系統的串联校正迴路	375
第八节	单迴路系統中，对主反饋迴路中引入的校正环节的綜合	380
第九节	內部反饋的綜合	390
第十章	变参数綫性系統	398
第一节	系数冻结法	398
第二节	对二阶綫性变参数系統的李亚普諾夫稳定性的充分条件	400
第三节	利用古尔維茨判据研究无限长時間內变参数 系統的稳定性	402
第四节	将变参数系統变换为《恒定》系統时自变量的置換	403
第五节	自变量置換法的准确度	411
第六节	繪制变参数系統傳遞函数的近似方法	415
第七节	系数作綫性变化的一阶环节的精确傳遞函数和結構图 ...	423
第八节	具有一个可变环节的系統稳定性和品质的研究	426
第九节	在常参数和变参数綫性系統中偏差的积累	430
附录		438
附录 I	代数方程式的解	438
附录 II	运算微积的基本公式	442
附录 III	将輸出訊号分解为三个分量的公式的推导	444
附录 IV	样板和列綫图	448
参考文献		457

第二版原序(节譯)

本书第二版与第一版的区别是更充分地討論了頻率分析，并从这个分析的角度出发論述了調节領域中某些卓越成果。在包含有新內容的各章中首先必須指出：在第八、第九章中討論了广义頻率分析，在第十章中討論了研究变参数綫性系統的工程方法。

本书的中心仍旧是頻率法。頻率法是由計算电力通信系統稳态过程的方法中轉入自动調节理論中来的，它可以认为是現代調节理論的主要研究方法。在最近拟定的返回到按根分布（根軌迹图）研究閉环系統性能的趋势，不仅沒有减小、反而增加了頻率法的意义，因为用这个方法來繪制根軌迹图最为簡單（第八章第三节）。

如同第一版一样，本书是基于用最簡單的数学工具（常系数微分方程式和拉普拉斯变换）来讲述的。只是在第七章第三节和第四节中討論按实验过程确定傳遞函数时，采用了矩陣运算，但是这里只指出了它的运算規則。

本书适用于从事随动系統和自动調节系統設計的工程技术人員。因此本书主要的不是証实調节理論的各个基本概念，而是指明它們在具体計算时的应用。因此本书中包含了大量的参考資料（古尔維茨稳定判据、代数方程式的解等）。对于自动調节系統方程式的列写方法也給予了很大的注意。

第一章 自动调节系统的一般概念

所谓自动调节系统是这样的一种系统：对它所要求的工作状态不是由维护人员，而是由作为此系统组成部分的自动作用装置来维持的，自动装置可分为机械的、电的、电气机械的或任何其他系统。自动调节系统的应用范围不可能一一列举，但是尽管应用范围和结构形式不同，可是按照作用原理来分则只能分成三类：开环工作系统，闭环工作系统，同时应用开环和闭环的复合系统。

在这一章中给出了这些自动调节系统的一般概念，引入了其他必需的概念和定义。同时特别着重于列写描述自动调节系统行为的微分方程式的方法。

第一节 按开环和闭环工作的系统

可以用如图 1 所示的直流电动机转速调节系统作为按开环作用的调节系统的例子。这个系统是用来实现变阻器 P 的滑臂位置和电动机 M 的转速之间的单值对应关系的：用手调整变阻器 P 的滑臂来确定发电机 G 发出的电压值，因而也就确定了电动机 M 的转速值。这个系统作用传递示于图 2。因为作用图具有开路的形式，故图 1 所示的系统属于按开环工作的系统。

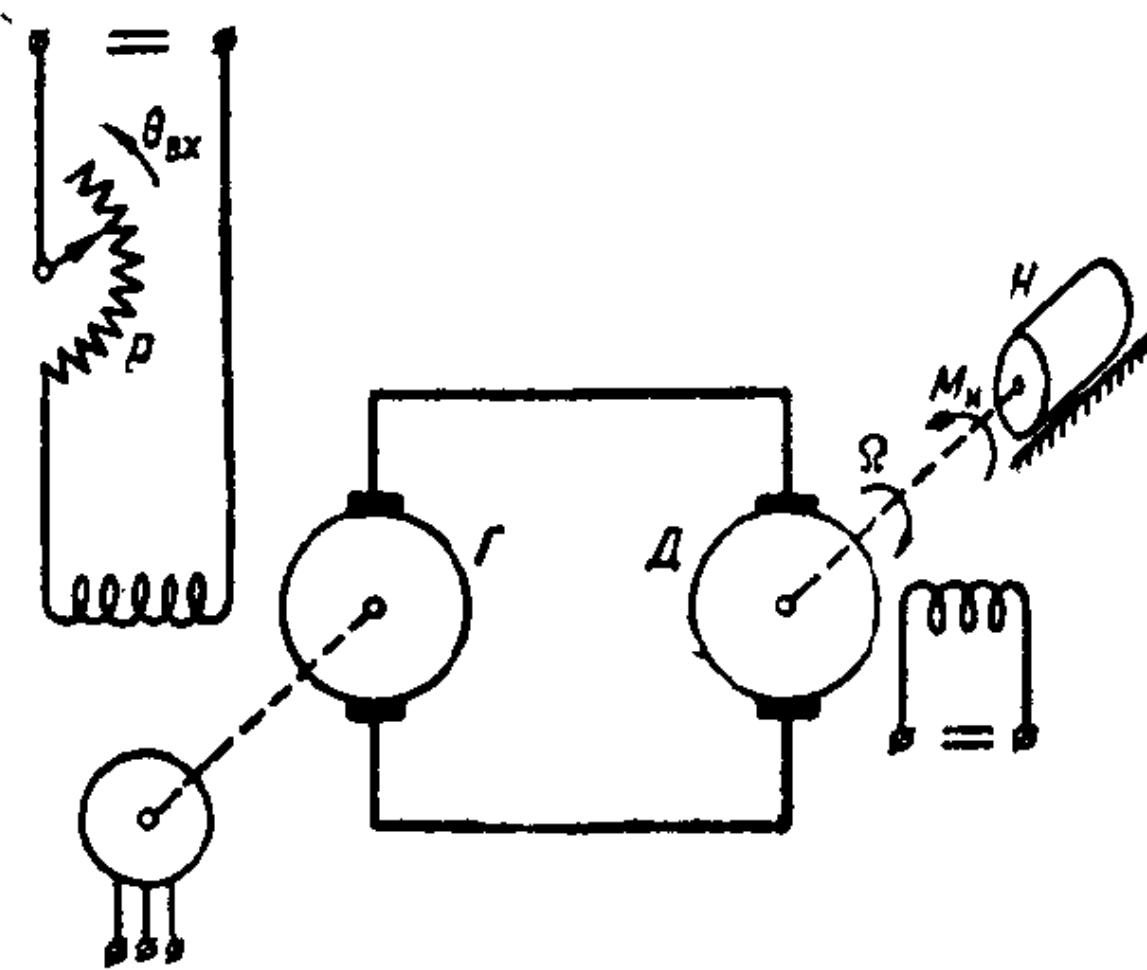


图 1 按开环线路工作的直流电动机的调速

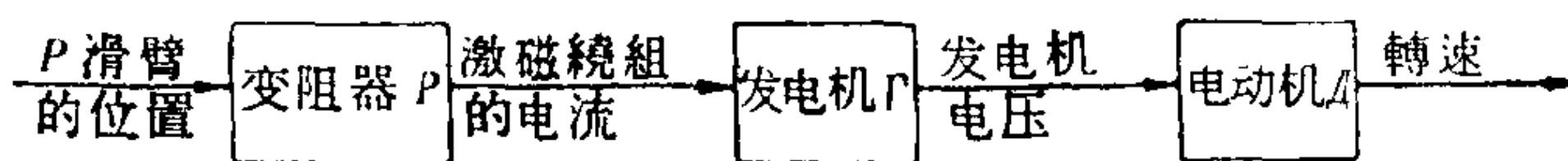


图 2 电动机开环调速系统的作用传递图

开环系统的主要缺点是准确度很低，因为被调量（电动机转速）与系统本身的参数（例如发电机轴的转数），以及与作用在此系统上的外扰作用（由负载 H 在电动机输出轴上产生的负载转矩 M_H 等）有很大的关系。例如，当变阻器 P 的滑臂在某一固定位置时，当负载转矩 M_H 变化时，电动机 Δ 的转速将按照电动机 Δ 的机械特性而变化。为了获得原先的转速值，必须手动改变变阻器 P 的滑臂位置。

为了减小系统参数变化和外扰作用对被调量的影响，采用了

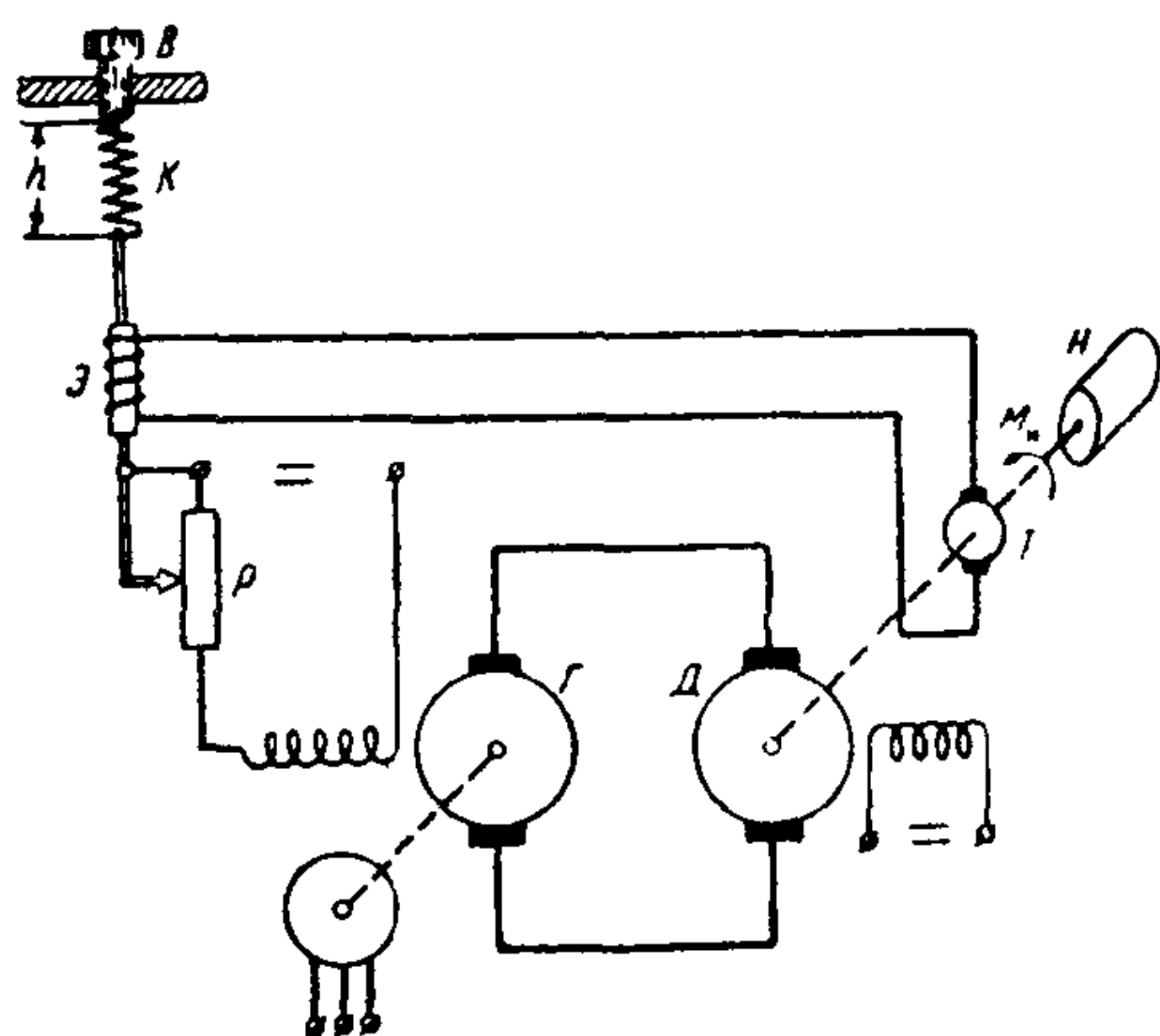


图 3 按闭环系统工作的直流电动机的转速调节

按闭环工作的系统。这种系统的特点是能自动将被调量的实际值与它的期望值不断地进行比较。作为比较的结果而出现的、等于被调量的期望值与实际值之差的失调量，将使系统动作，并且这种动作是向着消除失调量的方向进行的。这样一来，在闭环系统中由于偶然原因产生的

失调量将自动地趋于零或趋于很小的数值。因为这个失调量代表被调量与其期望值的差，即调节的不准确度，所以它也被称为系统的误差。

在图 3 所示的线路中，变阻器 P 的滑臂由手动调整改为自动调整。该调整量正比于电动机 Δ 的期望转速值（期望转速值可用

調整螺釘 B 來確定) 和與彈簧 K 的壓縮量 (被由測速發電機 T 供電的電磁鐵 $\mathcal{G}$ 所壓縮) 成正比的實際轉速值之差。因此, 就從開環系統 (參閱圖 1) 獲得了閉環系統 (參閱圖 3)。這個系統的动作如下: 如果電動機的轉速等於額定值, 則電磁鐵 $\mathcal{G}$ 所產生的力就平衡了彈簧 K 的壓力, 於是變阻器 P 的滑臂就占有某一固定位置。當速度偏离額定值時, 例如, 由於負載轉矩 M_n 的增加而使速度降低時, 電磁鐵所產生的力減小了, 因此彈簧就使變阻器 P 的滑臂向下移動; 此時發電機激磁繞組中的電流增大, 因此電動機的速度將增加, 而趨近其額定值。

測量閉環系統中失調量的裝置被稱為比較裝置。在上面討論的系統中, 比較裝置包括彈簧 K 、變阻器 P 、測速發電機 T 和電磁鐵 $\mathcal{G}$ 。

上面所討論系統的作用示於圖 4。它具有閉環的形式, 這就表明它是一個按閉環工作的系統。閉環系統不僅可以用來使被調量保持常值, 也可以用來將某些輸入訊號 (如軸的轉角) 實現遠距離傳輸, 同時進行功率放大。

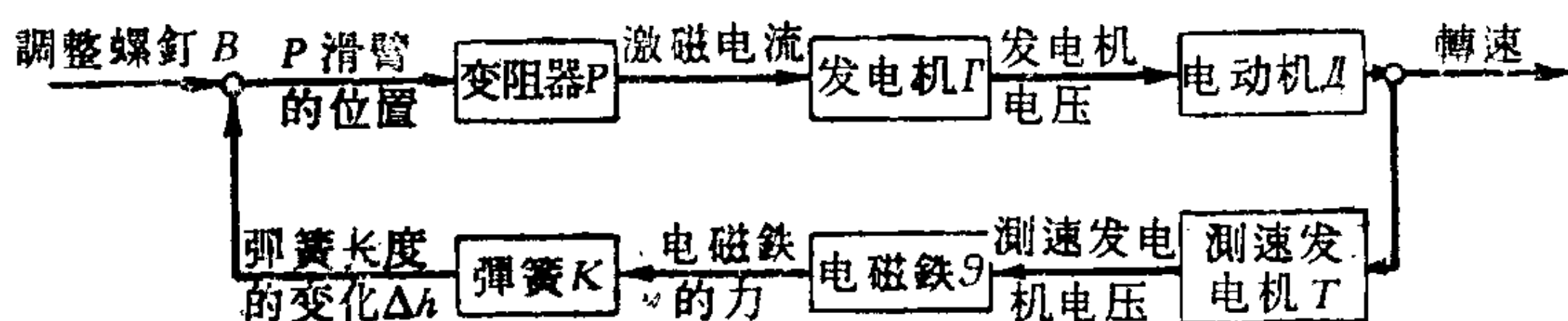


圖 4 按閉環系統工作的電動機調速系統的作用傳遞圖

任何一種用來跟隨 (模仿) 某一輸入訊號的閉環系統 (與用以保持被調量為恒定的給定數值的自動調節系統不同) 稱之為隨動系統。如同任何閉環系統一樣, 在隨動系統中利用某種比較裝置 (例如, 利用機械差動裝置) 自動進行輸入量 $\theta_{\text{BX}}(t)$ 和輸出量 $\theta_{\text{BYX}}(t)$ 的比較; 此時出現的誤差訊號 $\varepsilon(t)$ 經過放大器來控制執行機構的工作, 後者是一台可反轉的電動機 (圖 5)。相應

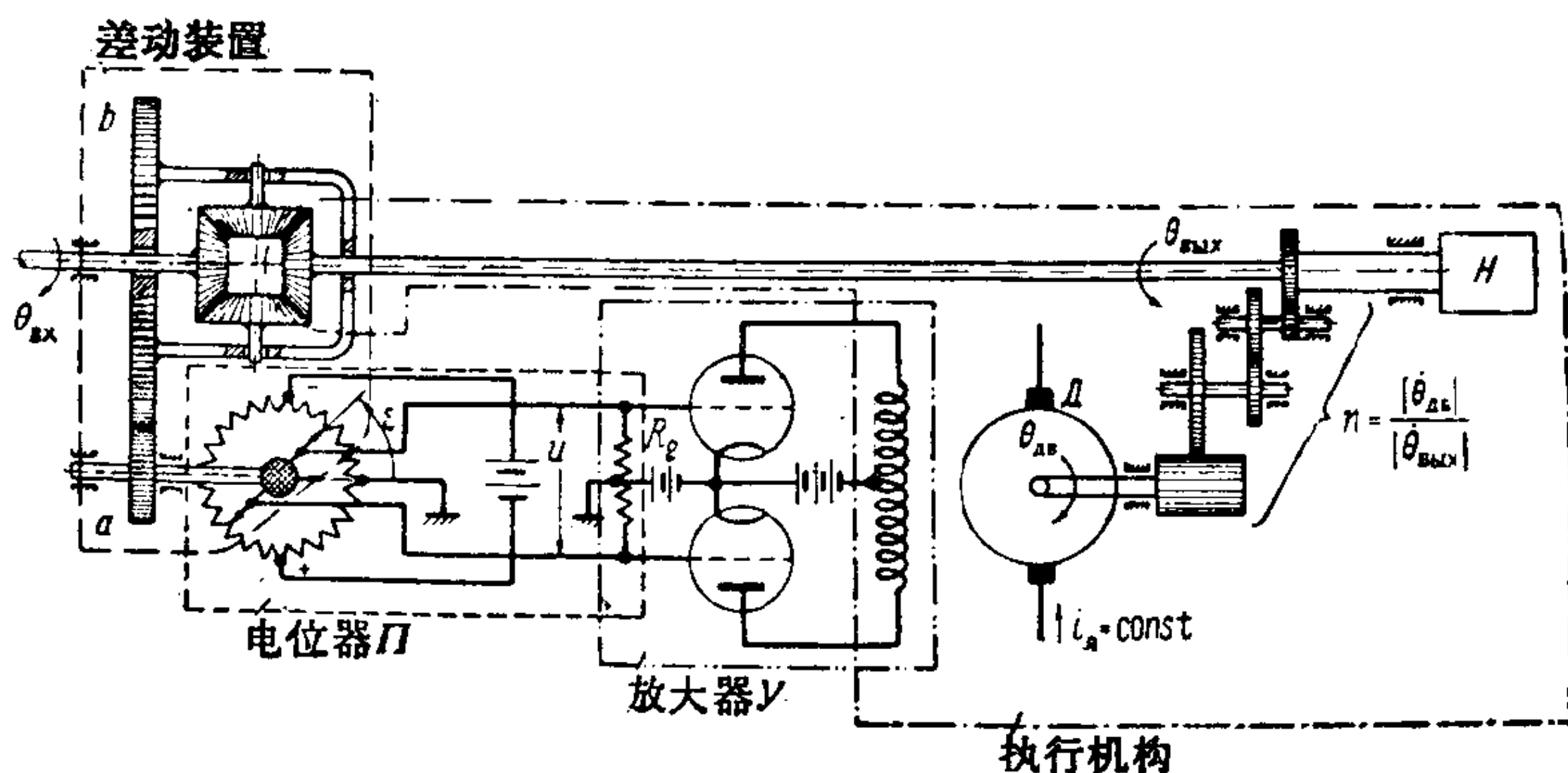


图5 随动系统的原理图

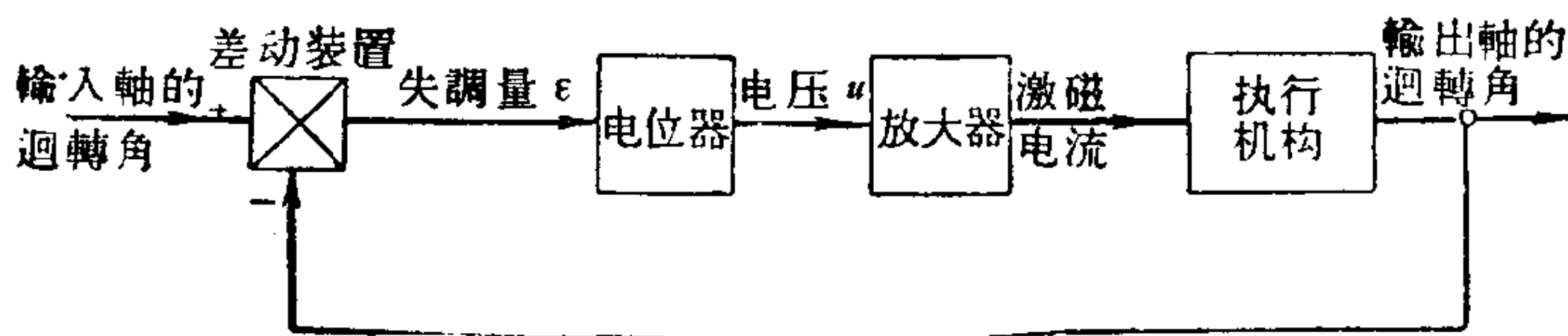


图6 图5所示随动系统的作用传递图

的作用示于图6。

除了上面所指出的优点（调节准确度比较高）以外，闭环系统也有缺点，其中主要的是保证它们的工作稳定性的问题[●]。

可以用如图7所示的随动系统作为复合系统的例子（参阅第五章第六节）。这个系统本身包括开环支路（输入轴，测速发电机，给定环节，放大器 V_1 ，电机放大机 ΘMY ，电动机 M_1 ，差动装置 D_2 ，减速器 P_2 ，负载 H ）和闭环部分（差动装置 D_1 ，校

● 闭环系统的稳定性决定于系统所包含的各个环节的放大系数和时间常数。开环系统各环节的放大系数和时间常数对这一系统的稳定性没有影响（关于稳定性，可参阅第二节和第八节，关于放大系数和时间常数可参阅第二章第五节）。