

高等學校教學用書

汽輪機與燃氣輪機的調整

上 冊

蘇聯 И. И. 基利洛夫著

電力工業出版社

734

高等学校教学用书

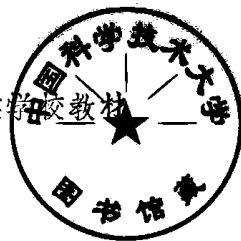
汽轮机与燃气轮机的调整

上册

苏联 И.И.基利洛夫教授著

余克 繙译

苏联高等教育部批准作为高等工业学校教材



电力工业出版社

內 容 提 要

本書敘述機器的調整，分析現行的調整系統，並研究這些系統主要構件的構造特點。

本書分兩冊出版。上冊內容包括第一第二兩篇，下冊包括第三第四兩篇。第一篇敘述調整靜力學。第二篇敘述調整動力學和研究調整過程的方法，並探討許多特殊調整問題（摩擦、延遲等的影響）。第三篇內容包括調整系統的基本知識和現代汽輪機的保护裝置。第四篇略述開式燃氣輪機裝置的調整動力學。

本書經蘇聯高等教育部批准為高等工業學校的教材，但也可供從事汽輪機和燃氣輪機的設計和運行工作的工程技術人員參考。

И. И. КИРИЛЛОВ

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1952

汽輪機與燃氣輪機的調整 上冊

根據蘇聯國立動力出版社1952年莫斯科版翻譯

余 克 編譯

*

464 R 107

電力工業出版社出版（北京府右街26號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

787×1092¹/₂₅開本 * 9¹/₁₆印張 * 202千字 * 定價（第10類）1.20元

1956年11月北京第1版

1956年11月北京第1次印刷（0001—5,100冊）

原 序

1938年曾發表過一本專題論文集，其名為“汽輪機的自動調整”。本書可以說就是這本論文集進一步的發展。“汽輪機的自動調整”一書是根據我當時在工廠和學院內對汽輪機製造工業的工程師所講授的課題編寫而成。在編寫該文集時曾廣泛利用了波爾宗諾夫中央鍋爐汽輪機研究所的研究成果。波爾宗諾夫曾因恢復И. А. 威施聶格拉特斯基所創立的著名的調整學派而獲得功勳。

И. А. 威施聶格拉特斯基的思想，早在上一世紀中，在著名的斯拉伐克學者 А. 斯托陀爾的關於調整理論的經典著作中，已獲得光輝的發展。無疑地威施聶格拉特斯基和斯托陀爾的著作，對於機器調整理論的發展，有決定性的意義。不過他們的高深理想，很久都不能全部為實踐家和許多理論家所了解。文獻中繼續出現過許多複雜的離心式調整器的方案，從實用的觀點來看，這些研究都是徒勞無益的。許多關於機器調整理論的著作，都建立在調整動力學一問題的不嚴格不明晰的概念上。這曾導致許多工程技術人員不了解直綫的調整理論，對於分析機器調整原理方案的動力性質有着巨大的實際意義。

僅僅在三十年代中，列寧格勒工學院教授 И. И. 沃茲聶生斯基曾詳盡無遺地闡明威施聶格拉特斯基學派的真正意義，並用自己個人的關於機器調整理論的著作，在蘇聯科學院、中央鍋爐汽輪機研究所和在基洛夫工廠極力促進這一門技術的發展。

調整學派的思想導源於威施聶格拉特斯基，這種思想也曾團結了許多蘇聯的著名學者（沃茲聶生斯基，安得羅諾夫等人）；本書是以整個俄國調整學派的共同思想為根據的。本書一般結構仍保持與“汽輪機的自動調整”一書一樣，全部教程分為兩部分：調整靜力學和調整動力學，因為開始時在課程的第一篇，說明調整靜力學上很重要的，同時也很簡單的問題，能促使初學者容易掌握課程的內容。

現代汽輪机和燃气輪机的制造，型式繁多，以致不可能在一本比較不大的教本中，將其在調整动力学範圍內所遇見的問題，全部加以研究。不过事实上也無必要，因为如果利用苏联学者所創立的那些原理上的調整方案的一般分析方法，則解决所提出的問題，在原則上没有什么困难。因此本書的第二篇專供用来講述机器調整动力学的一般問題。这些問題的解决就要涉及各式各样的調整裝置。

第二篇的基本內容为原理上的調整方案稳定性的分析。这里特別注意利用威施聶格拉特斯基圖，一直到現在，这个圖在解决許多汽輪机和燃气輪机的調整理論的問題时都被人遺忘了，这是很不應該的，因为威施聶格拉特斯基的研究成果在这方面有着很重要的意义。为了近似的求出調整过程在数量上的特性(被調整参数的动力猝动，減縮率等)，在这一篇內也敘述了以前各个著作者所發表过而在某种程度上由我补充的材料。

此外在第二篇中，对由于調整系統的不完善而引起的各种物理現象，也作了扼要的敘述，因为这些現象一直在实际上常常遇到。同时也指出防止上述缺点的基本方法。这些現象，都根据斯托陀尔的論文，卓越的苏联学者的著作(А. А. 安得罗諾夫，А. И. 路尔耶等人的著作)和我的一些研究加以闡明。

本書第三篇的內容包括对汽輪机調整的特殊問題的分析。本書第一版曾敘述中央鍋爐汽輪机研究所在汽輪机調整动力学方面所作的研究的主要成果。与該版比較起来，这本論文集含有許多补充章节，这些章节專供敘述关于帶节流滑閥的和帶差动繼动器的調整动力学的新的研究成果，以及关于液压調整动力学的新的研究成果。此外本書又提出最新的調整系統，这些系統都是列宁格勒斯大林金屬工厂(ЛМЗ)、聶夫斯基列宁机械制造工厂(НЗП)和哈尔科夫基洛夫汽輪發电机工厂(ХТГЗ)所制造。在哈尔科夫汽輪發电机工厂內，液压調整系統已經在 А. В. 謝格利雅叶夫的領導下，根据傑尔任斯基至苏热工研究所的設計而制造成功。

在第三篇內也指明最重要的汽輪机保护裝置，并規定了一些基本情况，作为选择汽輪机調整系統的经济基础。

在第四篇中簡單地說明單軸和雙軸燃氣輪機裝置的調整動力學的原理。關於這個問題的文獻幾乎完全沒有。在發揮燃氣輪機裝置的調整理論時，我力求表明，如果利用第二篇所述的調整理論的一般結論，則在解決實際上的重要問題時就會很簡單。例如，可以證明，壓縮機組在雙軸燃氣輪機裝置的調整過程中，和繼動器在間接調整過程中一樣，起了同樣的作用。這樣，對於燃氣輪機的調整理論，就可以利用第二篇所得的關於間接調整過程的特性（質量和數量上的）的許多結論。

為了使本書能夠用作高等技術學校學生的教材，我既注意於必要的敘述的系統性，又注意於結論的簡單化，以便使充分具有教學大綱所規定的理論修養的學生，能夠完全了解並不需要其他幫助來閱讀本書。正是為了這個目的，我在本書中列入了某些在專門論文中可能省略的補充材料。

書中最重要的公式號數用粗號字表示。

最後我应当向幾位同志表示謝忱：B. R. 切爾諾姆工程師，他對我這本書加以極詳細的評論；工業科學碩士B. Д. 皮文和工程師A. И. 米茨凱維奇，他們對這本書作細心的校訂；以及E. Э. 黎爾諾夫，他費了許多工夫為本書編輯全部插圖的簡圖。

著 者

目 录

緒論	7
----------	---

第一篇 調整靜力学

第一章 調整器	14
1-1. 离心式調整器	14
1-2. 調整器的支持力	15
1-3. 傳遞离心力	17
1-4. 离心式調整器的特性	18
1-5. 不均匀系数	22
1-6. 不灵敏系数	25
1-7. 調整器的工作能力	27
1-8. 离心式調整器的構造	28
1-9. 調整器彈簧的計算	34
1-10. 离心式調整器的計算实例	36
1-11. 压力調整器	38
1-12. 压力調整器的特性	44
1-13. 溫度調整器	46

第二章 間接調整	49
2-1. 繼动器的功用	49
2-2. 帶槓桿式开关的間接調整原理圖	50
2-3. 帶节流滑閥的間接調整方案	54
2-4. 液体节流系数	58
2-5. 繼动器內的摩擦力	60
2-6. 繼动器尺寸和構造特性的确定	64

第三章 被調整参数数值的变化	75
3-1. 改变被調整参数数值的方法	75
3-2. 用輔助彈簧来改变被調整参数数值的裝置	76
3-3. 借改变傳动机構来改变被調整参数数值的裝置	79

3-4. 平穩复原調整法	81
第四章 汽輪發電机的靜力調整特性	85
4-1. 汽輪發電机构件的調整特性	85
4-2. 靜力調整特性	83
4-3. 併列运行汽輪机的靜力調整特性的作用	91
4-4. 改变靜力調整特性曲綫斜度的裝置	94
4-5. 功率調整	96

第二篇 机器調整动力学

第五章 研究調整过程的方法	93
5-1. 調整动力学的問題	93
5-2. 小振動	100
5-3. 运动微分方程式的研究	102
5-4. 拉烏特-古尔維茨的穩定性准則	107
5-5. 米哈依洛夫的穩定性准則	110
5-6. 非週期性的过程	115
5-7. 运动方程式的积分	119
5-8. 对于因次的註釋	122
第六章 直接調整动力学	122
6-1. 轉子方程式	122
6-2. 气体容积方程式	128
6-3. 調整器方程式	130
6-4. 切向慣性力和柯黎奧李斯慣性力对于 錐形离心式調整器运动的影响	138
6-5. 調整器質量对于調整过程的影响	139
6-6. 調整器中干摩擦对于直接調整过程的影响	143
6-7. 机器的自动調整性質对于調整过程的影响	149
第七章 間接調整动力学	154
7-1. 間接作用調整器的方程式	154
7-2. 繼动器方程式	159
7-3. 帶有节流滑閥的彈簧繼动器的方程式	169
7-4. 开关和机器的自动調整性質对于調整穩定性的影响	172
7-5. 調整器質量对于間接調整穩定性的影响	174

7-6. 几个串联接合繼动器的調整系統的稳定性	181
7-7. 被調整参数的动力猝动和減縮率	186
7-8. 繼动器定速时的調整过程	192
7-9. 質量很小的調整器內摩擦力对于間接調整过程的影响	196
7-10. 鉸鏈間隙, 正搭接和滑閥摩擦对于調整过程的影响	208
7-11. 調整延迟对于稳定性的影响	211
第八章 平稳复原調整, 按生产和按負荷調整	213
8-1. 平稳复原調整动力学	213
8-2. 平面离心式調整器的动力学	218
8-3. 具有生产的补充冲量的間接調整	224
8-4. 具有負荷的补充冲量的間接調整	230

緒 論

本書的目的是研究机器自动調整的原理，特別是汽輪机和燃气輪机的調整。

机器的力場由下列各力組成：(1)用以产生有效功和克服全部有害阻力的主动力(例如作用在汽机輪叶片上的蒸汽和燃气压力)；(2)預定用机器克服的有用阻力(如被帶动的發电机，压縮机等阻力)；(3)消耗功的有害阻力，克服这种阻力不是机器的直接任务，同时由于物体的物理性質，此种阻力是不能消除的(如摩擦力)；(4)机器工作平衡时不發生作用的力，因为这些力依次地有时完成正功，有时完成負功(如机器各部分的重力，彈簧力，往复运动部分的慣性力等等)。

如果机器的轉子以指定的速度旋轉，并且它的力場处在平衡状态，則这就是机器的稳定运动，也就是規定的工作方式。一部机器应当如此設計，使它能在人所需要的任何工作方式下运行。

在工質的参数为一定时，汽輪机內的主动力，依轉子的旋轉速度而定。为了示例，在圖1上繪出汽閥在一定位置时汽輪机的特性曲綫(曲綫1)，以及在电力網阻力为一定的情况下發电机阻力矩 M_0 的变化与轉速的关系曲綫(曲綫2)。圖中縱座标为轉矩 M ，橫座标为旋轉角速度 ω 。在这兩条特性曲綫的交点 a 处

$$M = M_0 = M_{00},$$

而角速度 ω_0 与机組的稳定运动相对应。

如果汽閥的开度或蒸汽的参数起了变化，則特性曲綫1即移至另一位置(曲綫3)，这样稳定运动就会在另一个角速度下出現。又如用戶改变电力網中的电阻，角速度也發生变化，这就使發电机的特性曲綫2的位置發生变动(曲綫4)。这样，在蒸汽参数和汽閥位置为一定时，某一旋轉速度就与电力網中每一电阻相当，而所有可能的工作狀況都位在曲綫1上，因而在这种情况下，这条曲綫就是整个机組的靜

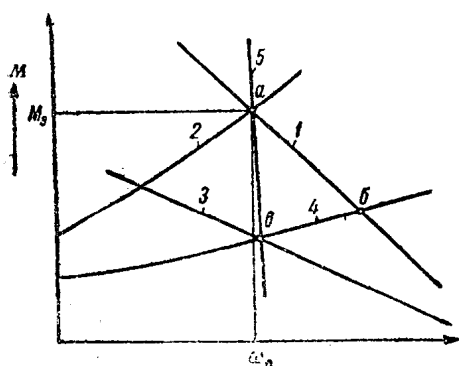


圖 1 汽輪机和發電机的特性曲綫

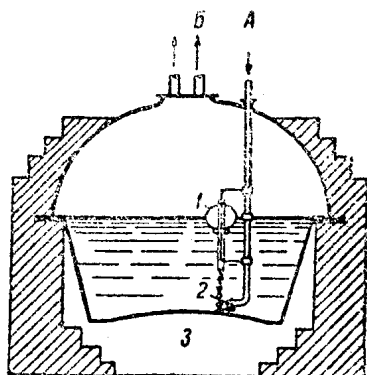


圖 2 И. И. 波尔宗諾夫的水平調
整器的簡圖

A—給水管；B—蒸汽支管；
1—浮子；2—閥門；3—火爐。

力特性綫。这里可看出用戶所用电量变化虽不大，但也引起旋轉速度激烈的变化，从而所得到的供电品質完全不能滿意。例如在圖 1 上，当汽輪机的汽閥位置不变时，負荷从 100% (点 a) 变到 75% (点 b)，相当于增加旋轉速度約 60%。这种情况，不論从运轉目的來說，或是从机器强度來說都是不允許的。

由于上述理由，自然就要求这样来控制机器，使轉子的旋轉速度在一定范围之內变化。为此，抵抗力变化多少，即發电机特性曲綫轉移多少，汽輪机的特性曲綫也应按比例轉移多少——在本例中是依靠变化蒸汽的消耗量和变化在噴管前的蒸汽参数，这就要借調动汽輪机的工質分配机构来达到。这时随着电力網阻力降低(曲綫 4)，蒸汽消耗量也随着相应地降低(曲綫 5)，因此，这两个特性曲綫的交点 b，只相当于旋轉速度稍有增加(当負荷变化 25% 时增量約为 1%)。当汽輪机和發电机的特性同时变化时，机器所有可能的稳定工作情况，都由曲綫 5 上的各点所决定。这样，借助于分配机构，使主动力与阻力相适应，是控制机器方法之一，用这方法可得到所希望的靜力特性直綫。

在力学尚未得到充分發展的时候，以及直到今天在某些机器內，由于机器过分复杂，因而恢复机器中被破坏的力場平衡，是用人工来

實現的。但是，從機器動作可靠性的觀點，以及從機器所得到的能量的性質和價值的觀點來看，對機器所提出的要求，促使我們承認好機器最主要的性質之一，就是能夠自動地用調整器來調整。

早在 1765 年，И. И. 波爾宗諾夫就在蒸汽動力設備中採用了自動調整。這個任務就是根據機器所消耗的蒸汽量來補充一定數量的水進入鍋爐，以保持物質的平衡。И. И. 波爾宗諾夫用保持鍋爐水鼓內的水在一定的水平的方法來解決這個問題（圖 2）。因此，在波爾諾夫的方案中，被調整的參數是水鼓中水平面的高度。隨水平高度的變化，用作控制機構的浮子便變更其位置，並借浮子之助來改變給水閥的開啓程度。這樣的調整方案在原理上已應用到近代發動機中來，調整速度、壓力和其他參數。用來調整機器的自動控制機構稱為調整器。

破壞機器力場的原因，也就是有用阻力本身變化的力，可直接用來作為帶動調整器並改變其形狀的沖量。但是發動機製造家通常按別種方式來進行，即在機器力場破壞時，讓轉子稍稍改變其速度。這個速度的改變也就用作沖量，使速度調整器發生作用。速度調整器則根據旋轉角度速度的大小來改變自己的形狀，由此機器的分配機構發生移動，因而主動力也發生相應的變化。

從純粹的理論觀點來看，速度調整器有他們的缺點，即他們只在機器內力場的破壞已經引起機器轉子速度改變的時候，才發生作用。不過實際上這個缺點並不嚴重，因為一個設計妥當的調整裝置，必能保持轉子的速度在極其狹小範圍之內。速度調整器的優點是很多的。除在許多情形中，如在發電時，機器轉子的旋轉速度必須保持一定外，還要注意到機器的強度，因為強度系就一定的最大速度來考慮的。所以用以控制機器的自動裝置，不管是哪一種，無論如何都應具有保證規定的旋轉速度的機構，就是應具有速度調整器，而無論由於負荷的沖量或其他因素的沖量，僅可用作補充。在這事可能實現的地方，則速度調整器便自然地負起控制機器的全部責任，從而使自動裝置簡化。

正因為如此，所以速度調整器才這樣廣泛被採用，以及凡具有自

动調整裝置的机器才都具有这种型式調整器，来作为自动調整机器的機構，或与別种調整器一起来作为控制机器的機構。

許多現代机器(汽輪机，蒸汽机等)不仅产生机械能，而且也是热力的供給者，这种热力是从發动机中工作完了的工質放出来的，或者由發动机得来的机械能，在工作机中(直接与發动机連接)轉变为位能(如被壓縮的空气，在压力下的水等等)。对于这种产品，消費者提出許多特別要求：如單位時間內一定的消耗量，固定的压力和溫度等等。

为了滿足这些要求，机器都裝有适当的調整裝置，它的作用与速度調整器的作用相似：在一切情况中，由于調整器的形狀与被其調整的參数的大小有关，所以調整器能引起机器力場这样的变化，使得被調整的參数的数值仅在某一定的範圍內变化。

調整器在执行其任务时，应移动工質或热量的分配機構。这些機構要移动的話，常常要消耗相当大的功率，而这些功率調整器自己不能發出。在这种情况下，不得不求助于繼动器^①。繼动器位在調整器与工質或热量分配機構中間的傳动机械中。繼动器把来自調整器的全部指示重复表达出来。他們从机軸或从别的来源得到能量，所以他們的功率可能是很大的。

無繼动器帮助的机器自动調整称为直接調整，而有繼动器帮助的自动調整称为間接調整。

直接調整的簡圖見圖3。被調整參数的数值变化时，調整器1的形狀依照这參数的变化而变化。 M 点称为調整器的指示器。运动从 M 点通过槓桿 $Ma6$ 傳到机器的分配機構2，因此被調整参数就适当地变化。調整器和分配機構的最大行程是这样选定的，使能保證机器在所有指定的情况中，有稳定运动的可能。

間接調整簡圖見圖4。調整器1移动繼动器的分配機構2，則繼动器的活塞3發生运动，从而机器的分配機構4也發生移动。这样，繼动器就称为这样的机械，它由在汽缸中运动的活塞以及和活塞联系

① 在文献中繼动器常称为伺服机。

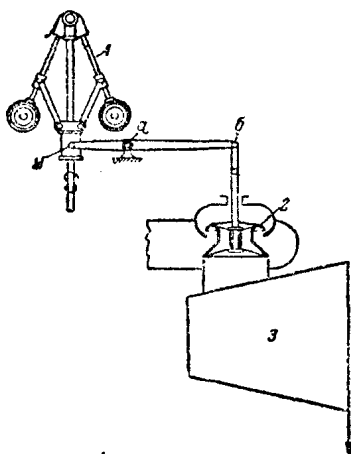


圖 3 直接調整簡圖

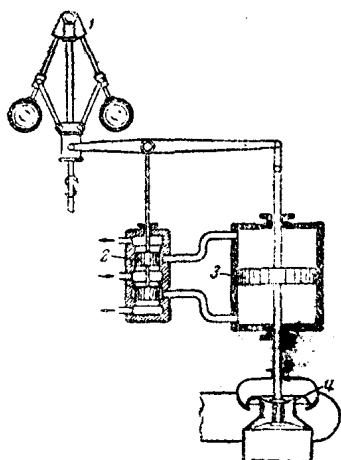


圖 4 間接調整簡圖

的滑閥所組成。

控制機構(調整器)、傳動機械與繼動器及機器分配機構(汽閥、活門等)一起構成調整系統，其餘參加運動的機械裝置原件則組成被調整系統。

當研究各種調整系統時，必須解決好些問題，現在讓我們來作簡略的討論。

機器自動調整的第一個基本任務，就是保證發動機能在計劃所規定的一切情況下工作，換言之，在於建立消費者所需要的動力裝置的靜力特性。研究這個問題的部分稱為調整靜力學。

根據動量矩^①的理論[文獻 41]，系統總動量矩對轉子軸綫的時間導數，等於各外力對該軸綫的總力矩，即

$$\frac{d}{dt}(I\omega) = M - M_c,$$

式中 I ——轉子的轉動慣量；

M ——主動力矩；

M_c ——阻力矩。

① 即角動量。——譯者

因为阻力力矩在机器工作过程中經常变动，所以力場平衡受到破坏，而机器的运动部分則按照上式或者加速或者減速。这样，調整系統与机器有动力上的关系。当机器从这个方式过渡到另一种方式时，这个关系就决定調整过程。

第二个基本任务是建立調整系統。以便当机器由一种工作方式变化到另一种方式时，調整系統能保証机器运动的稳定性和令人滿意的調整过程。用来解决这个問題的部分称为調整动力学。

我們来研究圖 3 所示的具有調整系統的机器运动。作用于机器的主动力和諸阻力間彼此沒有关系，因为阻力可能是由能量的消費者随意变更，可是消費者对于主动力并沒有任何直接影响。所以在机器运转过程中，当阻力發生任何变化时，机器內力場的平衡即受到破坏，并且机器的旋轉机件就得到加速或減速。調整系統的任务就是把机器引到力場开始平衡和將具有經常稳定的运动的第二个方式。从这个情况轉到第二个情况的过程中，振动式的运动可能随之發生。研究这个振动式的运动是調整动力学最重要的任务。

在選擇任何一个調整原理方案来研究时，首先必須解决下面这个問題，即当力場破坏时發生的振动將是阻尼振动呢抑是增長振动。經常导致增長振动的調整系統不适合用来調整机器。所以当研究調整动力学时，第一步必須把适用于机器調整或不适用于机器調整的方案分别开来，以及把保証阻尼振动的調整方案的設計原理拟定下来。我們解决这些問題时，要遵循 H. A. 威施聶格拉特斯基教授的理論；他在 1877 年把这理論解說得非常明白和全面[文献 14]。換句話說，我們用研究調整的穩定性的方法来解决这些問題。

如果以很小的初偏差和很小的速度加于調整系統，使其离开平衡位置，而这个系統在其随后的运动中离开所研究的平衡位置是非常小的話，則我們称此調整系統为稳定的[文献 41]。不滿足这个条件的調整系統称为不稳定的。

研究調整的穩定性的目的，是要对任何原理上的調整方案給以質量上的評價，也就是确定当机器的力場受到任何破坏时，这調整系統是否發生正确的作用，以及指出改进这調整方案的总方向。

現在假定所設計的調整方案能滿足靜力學的要求和穩定性的條件。但是能滿足這些條件的方案可能很多。重要的是從許多穩定的方案中選擇最簡單和最適宜的方案。對於許多動力裝置來說，當機器從一個工作情況轉到另一個工作情況時經常發生振動。知道振動的振幅、減縮率和週期也是重要的事。為了解決這些問題，對於機器工作情況變動時的調整過程，就要求作數量上的研究。這些問題是用運動方程式的積分來解決的。

只有在徹底研究調整過程之後，在分析工作的可靠性之後和對所選擇的整個方案及其一切原件作了詳細的經濟論證之後，才可推薦這個調整系統作為調整某種機器之用。

一般汽輪機，除裝有上述調整系統的機構外，還裝有自動的保護設備，其目的是預防事故。這些事故是與汽輪機在工作中的各種反常現象有關（如轉子轉速或工質溫度提高到不可容許的程度，機軸位移等）。

當用數學來研究任何實際系統的物理現象時，總是不得不用某一簡圖來代替，而以實際系統的基本特性賦予該簡圖。為了研究這一機構的主要特性，不應該對研究對調整機構的動作僅有輕微影響的各種次等現象，以免把問題的研究複雜化。注意這些小因素，只有蒙蔽了機構工作的真面目，並難於得到具有重要意義的正確結論。所以研究調整過程時，應專心致志於研究其主要特性，而次要現象的影響只應分別加以研究。

為了把影響調整過程的重要因素分別出來，必須深入了解被調整機器的工作過程，和那些擺在機器製造家面前的實際問題。所以機器調整問題和控制理論應當一起研究。只有在這個條件之下，研究者才可指望成功。

第一篇 調整靜力学

第一章 調整器

1-1. 离心式調整器

离心式調整器按主要部分(重錘和重錘的傳动機構)是在通过調整器旋轉軸的平面內移动或是在垂直于此軸的平面內移动,而分为錐形調整器和平面或軸裝調整器兩種。在汽輪机制造工業上,主要采用錐形調整器。

离心式調整器的簡圖見圖 5。調整器的主軸,常借蝸桿或齒輪由汽輪机軸帶动旋轉。掛在桿 AD 上的重錘就和主軸一起被帶动旋轉。重錘和桿一起可繞 A 点在通过主軸的平面內轉动。轉动时,重錘借桿之助沿主軸移动套筒 M 。

当調整器旋轉时,在离心力的作用下,重錘力求离开轉軸,但是

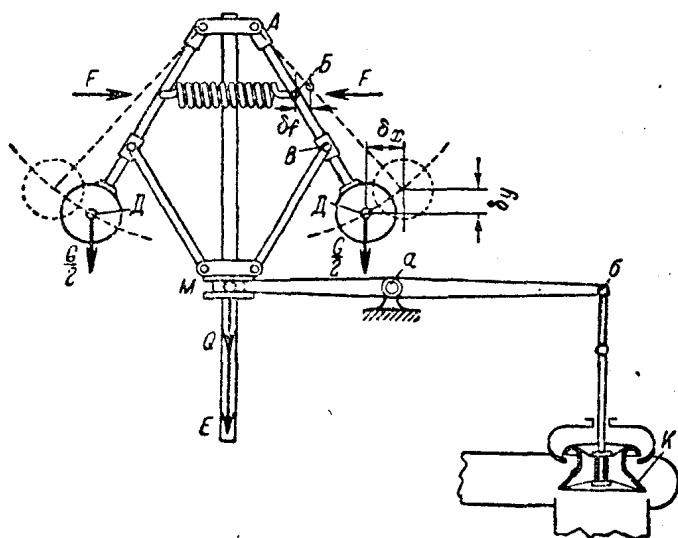


圖 5 离心式調整器簡圖