

机组动力学基础

〔苏〕 Вяч. А. 济诺维也夫 著
А. П. 别松诺夫

干东英 译

唐锡宽 校

内 容 简 介

本书阐述了单自由度和二自由度机组及具有变质量构件机组的现代动力研究方法，动力研究是与机械制造各种领域中的机组实际计算相联系的。

书中研究了具有各种发动机及工作机特性的复杂机组的运动分析的工程方法，也研究了它们的受力计算方法。

本书可供机械工程设计人员和机械科学研究人员参考之用。

Вяч. А. Зинovieв, А. П. Бессонов

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ

Издательство “Машиностроение” Москва 1964

机 组 动 力 学 基 础

Вяч. А. 济诺维也夫 А. П. 别松诺夫 著

于东英 译 唐锡宽 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

陕西省印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1976 年 4 月第 1 次印刷

1976 年 4 月第一次印刷

印数：0001—20,226

开本：787×1092 1/32

印张：7

字数：182,000

统一书号：15031·115

本社书号：613·15—3

定价：0.80 元

目 录

第一章 作用在机构上的力	1
§ 1. 前言	1
§ 2. 摩擦	2
§ 3. 惯性力	5
§ 4. 发动机及工作机的机械特性	6
§ 5. 机械特性的分析表示法	11
第二章 力和质量的转化	18
§ 6. 力的转化	18
§ 7. 质量的转化	28
第三章 具有单自由度的机组动力学（微分方程式能 得到求积形式解的情况）	35
§ 8. 转化力和转化质量与路程有关时转化构件的动力学	35
§ 9. 当力为速度和时间的函数时转化构件的动力学	43
第四章 具有单自由度的机组动力学（微分方程式不 能得到求积形式解的情况）	55
§ 10. 用动能方程式研究转化构件运动	55
§ 11. 用力矩方程式研究转化构件运动	67
第五章 当力同时随两个变数变化时的转化构件动力 学	86
§ 12. 航空发动机 AIII-82 增压机变速机构	86
§ 13. 当力随速度和路程变化时转化构件的动力学	94
第六章 在进行机组动力计算时有关飞轮的问题	97
§ 14. 前言	97
§ 15. 活塞式发动机机组的飞轮计算	99
§ 16. 冲击作用机器的飞轮计算	104
§ 17. 卧式锻造机的飞轮计算	107

§ 18. 解飞轮问题的简化方法	115
第七章 二自由度的简单机构	117
§ 19. 前言	117
§ 20. 用作转子动平衡的最简单的机器	118
§ 21. 定向作用的不平衡振动机构	125
§ 22. 振动机构运动的衰减过程	138
§ 23. 电机驱动的不平衡重振动机构的研究	146
第八章 具有两自由度的五构件机构	149
§ 24. 运动关系	149
§ 25. 五构件机构的动力学	153
§ 26. 无级惯性式力矩变量器的脉冲机构	162
§ 27. 具有弹性动态约束的联轴器	167
§ 28. 考虑摩擦的二自由度机构的动力研究	172
第九章 具有附加约束的某些机构的动力学	180
§ 29. 齿轮机构	180
§ 30. 具有摩擦离合器的机构	186
§ 31. 具有弹性约束的机构	190
§ 32. 摩擦传动	197
§ 33. 带电机的机构的动力研究	202
第十章 具有变质量构件的机组	207
§ 34. 前言	207
§ 35. 具有变质量构件系统的第二类拉格朗日方程式	212
§ 36. “硬化”系统的第二类拉格朗日方程式	219
§ 37. 机构构件的动能	220
§ 38. 质量的转化	226
§ 39. 具有变质量构件的平面机构的力矩形式的运动方程 式	227
§ 40. 具有变质量构件的平面机构的能量形式的运动方程 式	230
§ 41. 具有一个变质量构件的机构研究举例	232
参考文献	242

第一章 作用在机构上的力

§ 1. 前 言

1. 机构是附有几何约束的非自由系统。这些约束能使确定机构位置的坐标之间建立依赖关系，以及使这些坐标的一次和二次导数与某一预定的坐标（被称为广义坐标）之间建立依赖关系。广义坐标一般是指与不动构件（机座）相配合成为转动运动副的机构构件的转角。

广义坐标本身随时间变化，并且这种变化与作用在机构上的力有关。假若作用在机构上的力的变化规律是已知的，则可以确定机构广义坐标的变化规律，而且由于机构的坐标与广义坐标之间的约束是已知的，则就有可能确定它们以时间函数来表示的变化规律。

以上所述是关于具有一个自由度的系统。在具有数个自由度的系统中广义坐标的数目必须等于自由度的数目。在这种情况下，必须知道所有广义坐标与时间的关系。若作用在机构上所有力的变化规律为已知，则这些关系也可以建立。

在这一章，以及到第六章为止的各章中，我们将只研究具有一个自由度的系统；并指出在这种情况下应如何确定广义坐标与时间的关系。

2. 机构是用来实现所需要的运动的。这种运动是在拖动机组的机构的原动机影响下产生的。由原动机发出的力称作驱动力。此力的功是正值。

除驱动力外，必须注意机构在完成有用功时所产生的阻

力。这种力称作有用阻力(生产阻力)，此力作负功。上述两种形式的力是确定机构运动特性的基本力。

但是在机构运动及所述诸力作用时，还出现其他一些力，这些力在精确动态计算时必须考虑的。首先要注意到构件的重力，它随重心运动方向（向上或向下）而作正功或负功。

由于驱动力、有用阻力及构件重力的作用，在运动副中产生反作用力，这种反作用力本身不直接影响机构运动特性，但在运动副的元件表面上引起摩擦力。在进行动力研究时必须考虑摩擦力。因为这些力的功转变为扩散到周围介质中去的热量，所以在运动副中产生的摩擦力被认为是有害阻力。

在一般情况下，构件的运动是在加速度情况下进行的。如果应用达朗倍尔方法，并且在研究时引入惯性力，则在应用静力方法以后，即可确信在运动副中产生引起附加摩擦力的附加反作用力。

应当指出，还有一种作用在机构上的力，即机构在某介质中运动时的介质阻力。例如，由于空气介质可以引起这种力。装在充有润滑油的减速箱内的现代齿轮机构中(减速机)，齿轮部份地被浸在油中。齿轮在转动时搅动油，克服着油的阻力，消耗着由原动机发出的部份能量。

由上所述得出：已知机构的运动特性及其广义坐标与时间的关系是由加在机构上的各种力的特性来确定的。因此，产生了确定机构在各种外力作用下的运动规律问题。

§ 2. 摩 擦

1. 上面我们谈到，在机构运动副中反作用力的作用下引起了摩擦力。有时这种力是很大的，且在这些情况下不能忽略它们。当摩擦力不大的情况下，它们常是可以忽略的。

摩擦力是一种现象，当它存在时，在两个相接触的物体相

对移动过程中会产生阻力。摩擦分为两种形式：滑动摩擦及滚动摩擦。在滑动摩擦过程中，一个物体的同一点与另一物体的不同点顺序接触，而在滚动摩擦时，则在某一物体上相继顺序诸点与另一物体的相继顺序诸点进行接触。

转动摩擦是滑动摩擦的一种变型，其中位于两物体接触面上的各点的转轴为中心描出同心圆。

摩擦是一种复杂现象，直到目前还研究得不够，因此不可能对每一种个别情况都精确地确定摩擦力的大小。

2. 摩擦不可能用一个对于摩擦副来说是不变的系数来表述。但是，到目前为止，工程计算中还是应用下述关系式来确定滑动摩擦力：

$$F \leq f |P_{12}^n|, \quad (1)$$

式中： F ——摩擦力；

P_{12}^n ——构件 1 作用在构件 2 上的法向力；

f ——摩擦系数(图 1)。

虽然关系式(1)很简单，但在进行机构的力的分析时，它却往往带来很大的困难。关系式(1)只可以用来确定摩擦力向量 F 的模，同时，随着条件的不同(这些条件不反映于上述关系式中)，摩擦力的模可能有由零到最大的数值(该极大值是由不等式(1)的右端确定的)。摩擦力向量 F 的

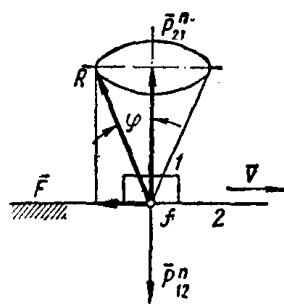


图 1 摩擦角及摩擦锥

方向与一摩擦体相对于另一摩擦体运动的速度向量 v 的方向相反。

摩擦体 1 和 2 (图 1) 以或多或少的力相接触着。设物体 1 上作用有一要该物体由左向右运动的力。如该力的数值小于不等式(1)右端的最大值，则将产生一种肉眼所不能看见

的、但却为精密仪表所能察觉的一个摩擦面对另一个摩擦面的弹性位移。当该推力增加时，变形位移也将增加，而当推力达到某一定值时，物体 1 相对于物体 2 便开始了可见的运动。实验表明：为了使物体 1 运动，需要有这样的力，该力较在随后的等速运动时所必须克服的力略为大一些。在开始时阻止摩擦体运动的极限阻力称为静摩擦力，而运动时所产生的阻力则称为动摩擦力。

摩擦系数 f 的数值不仅对于各种摩擦材料的组合有所不同，而且在相当大的程度上决定于摩擦表面的状态（粗糙度、干净的或有润滑的表面、预先静止接触的时间等等）。

总反作用力对法线的倾角 φ 是摩擦角（图 1）。摩擦锥是总反作用力向量 R 的可能位置的轨跡。根据图 1 可以确定摩擦角 φ 与摩擦系数 f 之间的关系。我们有：

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F}{P_{21}^n} = \frac{F}{P_{12}^n} = f, \quad (2)$$

式中： P_{12}^n 和 P_{21}^n ——分别为法向压力和法向反作用力。

3. 一表面在另一表面上滚动时产生滚动摩擦。图 2 表

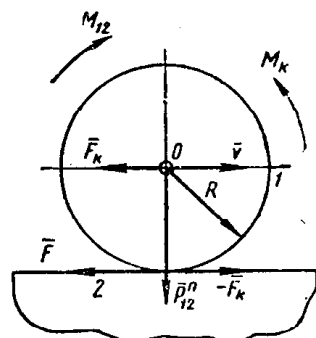


图 2 一物体在另一物体上滚动时产生的力

示一圆形物体 1，它处于法向力 P_{12}^n 和转动力偶 M_{12} 的作用下。假如物体 1 和 2 之间没有啮合摩擦力 F ，则中心 O 将静止不动，物体 1 将要绕固定中心转动。但如有摩擦力 F 作用时，则将发生滚动，并且此时产生阻力偶矩 M_k ， M_k 称为滚动摩擦力偶矩。这一力矩可以用一个作用在中心 O 上的力 F_k 和另

一个作用在物体 1 和 2 的接触点上、与其大小相等而方向相反的力 $-F_k$ 来表示。为了能无滑动的滚动，力 F_k 应小于啮

合力(滑动摩擦力) F , 滚动摩擦力可以由下列关系式确定:

$$F_k \leq \frac{k}{R} |P_{12}^n| \quad (3)$$

式中: k ——滚动摩擦系数, 以厘米计;

R ——滚动物体的半径;

P_{12}^n ——物体 1 压在物体 2 上的法向力。

由关系式(3)可知, 力 F_k 的数值与滚动物体的半径 R 成反比例。应当注意, 不等式(3)的意义与不等式(1)相同, 即由该式中只能确定滚动摩擦力向量 F_k 的模。向量 F_k 的方向与滚动物体中心的速度方向相反。

§ 3. 惯 性 力

1. 研究机构运动时必须考虑到的惯性力是一种质量力, 因为在一般的情况下, 运动体各点的加速度互不相同。在研究机构时, 必须将构件各质点惯性力归结为一个力及一个力偶。这种力在力学中称之为转化惯性力的主向量, 而由转化力偶所产生的力矩称之为构件质点惯性力的主力矩。

由力学中可知, 构件惯性力主向量 P_u 是由以下关系式确定的:

$$P_u = -ma_s, \quad (4)$$

式中: m ——构件质量;

a_s ——其重心 S 的加速度; 负号表明向量 P_u 的方向与重心加速度向量 a_s 的相反。

主惯性力矩由以下等式计算之:

$$M_u = -\varepsilon J_s, \quad (5)$$

式中: ε ——构件角加速度;

J_s ——构件对于通过重心的轴的转动惯量; 负号表示力矩的方向与角加速度的正好相反。

2. 在构件作移动运动时,则其角加速度等于零,因而在此运动中构件各质点的惯性力仅归结为主向量。

当构件作旋转运动时,可以由公式(4)及(5) 来确定惯性力。但在此时力和力偶可归结为一个力 P_u , 此力之向量相对于重心 S 移动,其移动方向与转动中心 O 的位置相反(图 3)。从重心至惯性力的作用点 K 的距离由以下关系式确定:

$$SK = \rho = \frac{J_S}{mR_S}. \quad (6)$$

构件总惯性力的作用线所通过的点 K ,称为摆动中心,因为就象在物理摆的情况中一样,如果构件的全部质量集中在该点上,则 将得到数学摆,其摆动周期将等于以迴转中心 O 为悬点的构件的摆动周期。

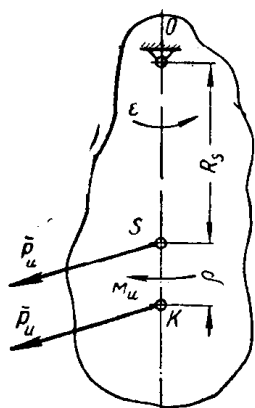


图 3 确定围绕构件
固定轴旋转时的惯性
力主向量和主力矩

3. 在构件平面平行运动的一般情况下,质点惯性力归结为力和力偶。按公式(4)确定力,按公式(5)确定力偶矩。用力平行移动方法可以一个力来代替力和力偶。

在上述情况下,我们曾经假定,构件具有几何对称的和平行于运动平面的平面。假如构件没有对称平面,则构件主惯性力矩是可以分解为沿平行于直角坐标系三个方向的向量。下面我们将不分析这种情况,因此此处不讲确定主力矩向量 M_u 的方法。

§ 4. 发动机及工作机的机械特性

1. 上面我们指出了,加于机构上的基本力为驱动力和有用阻力。

受驱动力作用的机构构件称为驱动机构,而承受有用阻

力的机构则叫作工作机构。

工程上应用的发动机是很不相同的，在每一具体情况下应选择何种发动机，要视机组应进行何种工作而定。为了取得长时间的机械功，应当采用可以在不定的长时间内将被转化的能量、热能、电能等输入其内的发动机。属于这类发动机的有热动机、液力机、电动机及某些其他的发动机等。

对于短时期重复性的工作可以应用电磁铁、弹簧。这种发动机必须储蓄能量以便聚集位能，这位能可转变为动能，然后，动能转变为机械功。例如，在起重机中应用着电磁制动器，其中依靠重锤的下落而实现制动，该重锤事先用电磁铁将其升高。为了制动，将电磁铁中的电流切断，因而下降的重锤便把闸瓦紧压在制动盘上。在不制动时，电路中通电的电磁铁将重锤升高，从而使制动盘不受闸瓦压力。

2. 当工作机进行某种工艺过程时，其中发生生产阻力。工程中所应用的工作机的特点是：它们的设备往往很复杂，并且其中进行的工艺过程也是多种多样的，因此有时很难确定其中力的大小和变化特性。

短时作用的机构(系用来带动与其相联的执行机构的)工作时也会产生阻力。

3. 这里，我们不涉及有关力能学的问题（这属于确定发动机所发出的力的问题），也不研究能够确定工作机阻力的工艺问题。所有外力都假设为给定的。通常，这些力以所谓的机械特性的形式给出的。

力参数与一个或几个运动学参数(路程、速度、加速度、时间)之间的关系称为发动机或工作机的机械特性。机械特性是由理论或实验研究的结果确定的，动力工程课程和工艺学课程从事此项研究。

根据发动机或工作机的不同类型，机械特性有的较复杂，

有的较简单。例如,重锤驱动的机械特性是一种常量的力(图4),弹簧驱动的特性是一种力与弹簧变形(即随路程)间的下降直线关系(图5)。电磁铁和螺管线圈的机械特性是多种多样的,并且是力与路程之间或力偶与转角之间的、比较复杂的关系。图6表示简单的电磁铁机械特性曲线之一。

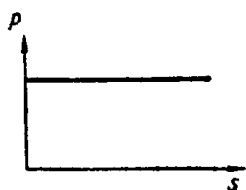


图4 重锤驱动的机械特性

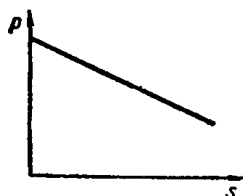


图5 弹簧发动机的机械特性

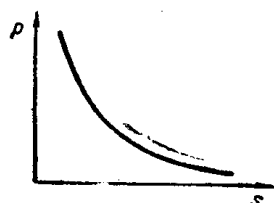


图6 电磁铁的机械特性

电机的机械特性是由转子发出的力矩与角速度的关系。

图7表示的是直流并激电机的机械特性,图8表示直流串激电机的机械特性,而图9为三相交流异步电机的机械特性。

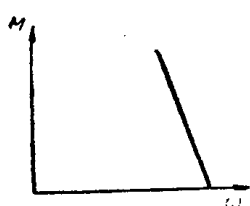


图7 直流并激电机的机械特性

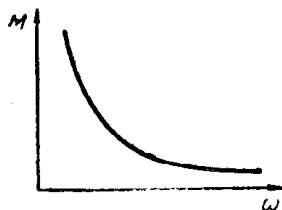


图8 直流串激电机的机械特性



图9 三相交流异步电机的机械特性

目前常常在起重机中采用一种专门的异步电机,其特性具有如图10所示的形式。

蒸汽机的理论机械特性是一个抛物线(图11)。但是由于许多原因,蒸汽机的实际机械特性与理论的不同。

图12表示内燃机的机械特性,它与其他的发动机特性有很大的不同。

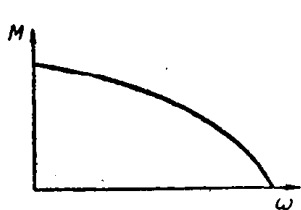


图 10 起重机专用的三相异步电机的机械特性

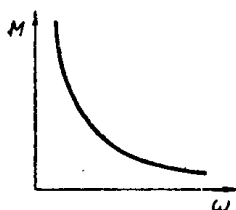


图 11 蒸汽机的机械特性

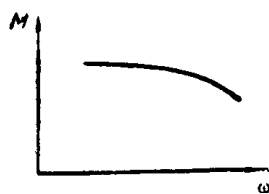


图 12 内燃机的机械特性

4. 各种发动机的机械特性用其刚性来鉴别。在表示机械特性的曲线上,某给定点切线倾角的正切值称为特性的刚度系数。

直流并激电机特性的刚度是不变的,而其它发动机的则是变化的。机械特性的刚度愈大,则在载荷变化时,发动机角速度的变化愈小。上面谈及的直流并激电机的特性是刚性的,而内燃机的刚度则不够。因之,对于诸如汽车的发动机来说采用了变速箱,因为这种发动机仅能在载荷变化不大的情况下工作。变速箱能使转化到发动机轴的阻力矩大致保持为常量。

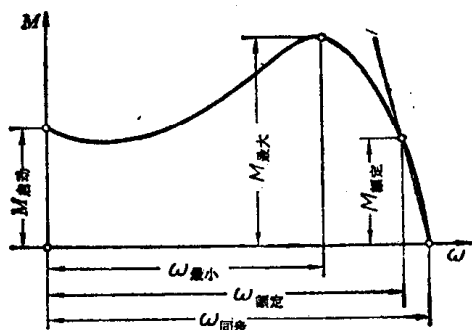


图 13 三相异步电机机械特性的基本点

$M_{启动}$ ——初始启动力矩; $M_{最大}$, $\omega_{最小}$ ——最大疲倒力矩与特性稳定部份的最小角速度; $M_{额定}$, $\omega_{额定}$ ——额定力矩与额定角速度; $\omega_{同步}$ ——同步角速度。

特别应当提到的是异步电机的机械特性(图 13), 最大力矩 $M_{\text{最大}}$ 的纵坐标将此特性分为两个部份。其左边称作非工作的或不稳定的部份, 右边称作工作的或稳定的部份。异步电机只有在特性曲线的工作部份才能保持不变的角速度, 因为在非工作部份, 任何载荷的增加都会使电动机停下来, 而在工作部份载荷的减小则会导致输出端速度增加。此种电动机仅能在阻力矩小于特性曲线的非工作部份的最小力矩时才能启动。

在异步电机的机械特性曲线上可以标出四个主要点: (1) 由同步角速度 $\omega_{\text{同步}}$ 确定的点, 此时电动机的力矩等于零; (2) 由额定角速度 $\omega_{\text{额定}}$ 和相应于电动机额定载荷的额定力矩 $M_{\text{额定}}$ 所确定的点; (3) 由最大力矩 $M_{\text{最大}}$ 及特性曲线稳定部份的最小许可角速度 $\omega_{\text{最小}}$ 所确定的点; (4) 由当角速度等于零时的初始启动力矩 $M_{\text{启动}}$ 确定的点。

异步电机特性的工作部份是刚性的, 因此, 外载荷的波动不会引起其转子角速度的很大变化。

5. 工作机按其机械性能可分为五类: 在第一类机器中生产阻力是常数(如起重机、轧钢机、刨床、造纸机等等); 在第二类的机器中, 阻力随速度而变化(鼓风机、排烟机、离心泵、离心分离器、螺旋桨等等); 在第三类的机器中, 阻力随路程而改变(活塞式压缩机和泵、切割金属的剪断机、矿井升降机、振荡式输送机、曲柄压力机); 第四类包括阻力随路程与速度而改变的机器(高速运输机); 最后, 在第五类机器中, 生产阻力随时间变化(碎石机、球磨机、揉面机等)。关于各种工作机的机械特性的知识可在相应的工艺学课程中获得。

6. 如上所述, 发动机的机械特性是以一个参数(即其转子的角速度)的函数形式给出的, 但在一般情况下, 驱动力却遵循着较复杂的规律。例如, 电动机的机械特性就是代表它

所发出的力矩与转子角速度的关系。这种关系只可以用来确定电动机克服固定载荷时的转子角速度。假如转子角速度变化了，则电动机的电流强度也变化，与此同时，电动机所发出的力矩也发生变化。这样，电动机所发出的力矩不仅随其转子角速度变化，而且亦随角加速度变化。在直流电机中转子角加速度对于它所发出的力矩的影响比异步电机中的影响更大。当电机载荷发生突然变化时，在快速进行的过渡过程中，转子角加速度对于它所发出的力矩的影响更为显著；在很多实际情况下，角加速度对于电机力矩变化的影响可以忽略不计。

表示电机所发出的力矩与它的转子角速度关系的电机的机械特性称作静态的，因为它的各点均在转子角速度的各个常值下(即在静态条件下)通过理论和实验方法获得的。

§ 5. 机械特性的分析表示法

1. 发动机及工作机的机械特性多半是复杂的关系式，并以曲线形式表示之。机构的动力研究在很多情况下适于用分析方法进行，以便确定机组基本参数的变化规律。当机构的运动微分方程可解，并将其解以最终形式表示时，这是可能的。假若发动机及工作机的机械特性是运动参数的复杂函数的话，用分析方法则是不可能的，此时微分方程就必须采用计算方法或图解法来解。利用这些方法取得个别特性的结果，根据这些结果不能作出一般性的结论。

根据这些概念，在很多情况下希望把微分方程式以能得到最终形式解的方式表示。为此目的，我们将把发动机和工作机器的机械特性以不复杂的代数式来表示。实际上这完全是可行的，因为机械特性多半是运动参数的近似关系式。

2. 在某些情况下，在机构运动的某些段上，转化的阻力

矩可以常量形式表示。例如在二冲程(所谓工作行程与空载行程)下工作的冲击作用的机器。在这些机器中,工作行程一般比空载行程短,且工作载荷大大地超过空载行程的载荷。图 14, *a* 表示转化阻力矩与时间的关系图,图 14, *b* 表示同样的转化阻力矩与转角的关系图。

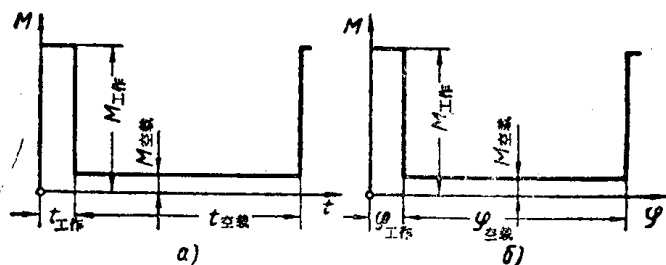


图 14 冲击作用的工作机械特性图:

a) 力矩与时间的关系;

b) 力矩与机器主轴转角的关系

如图 14 所示,工作行程力矩值 $M_{\text{工作}}$ 比空载行程力矩值 $M_{\text{空载}}$ 大得多,但工作行程的时间间隔 $t_{\text{工作}}$ 和转角间隔 $\varphi_{\text{工作}}$ 值却远较空载行程的时间间隔 $t_{\text{空载}}$ 和转角间隔 $\varphi_{\text{空载}}$ 小。

在工作及空载行程时间内 $M_{\text{工作}}$ 及 $M_{\text{空载}}$ 值一般是变化的,

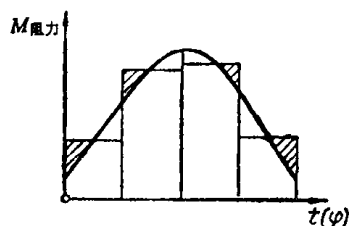


图 15 用阶梯形直线代替曲线形的机械特性

但是,在类似图 14 所示的图线上应表示它们的平均值。当工作行程时间很短,而空载行程载荷值很小时,这种近似概念是正确的。

3. 假如转化阻力矩 $M_{\text{阻力}}$ 连续变化,且其图线为曲线的话,则这种图线可以分为单独的若干部份,每一部份的曲线段都可用直线段代替,如图 15 所示。

此时,在此每一段上阻力矩为一常量。若以阶梯形折线

代替已知曲线,作水平线段时可以目视估计,以使处于曲线外部的、画斜线的三角形面积等于曲线内的相应的三角形面积。

4. 在机组稳定运转时,在某些情况下,发动机轴的角速度是一常量。研究这种运动没有甚么困难。当发动机轴的转速在稳定运转下产生周期性的变化时,研究就会发生困难。在此情况下,速度在某些极限值(以其极值 $\omega_{\text{最大}}$ 及 $\omega_{\text{最小}}$ 表示)之间变化。随同速度变化,发动机发出的力矩亦变化。作动力计算时,必须注意角速度和转动力矩的变化特性。这些变化的特性可用相应的微分方程式的解确定之。为用分析法解此方程,在表示发动机机械特性的曲线上选出一段,在此线段上,发动机的特性可以用直线段或抛物线的形式表示。

在第一种情况下当驱动力矩在狭窄范围内变化且曲线与直线的相差不很大时,曲线的一小段可以用一直线段来代替。如果驱动力矩的两极限值彼此相差很大,则在此情况下,当我们所研究的机械特性的那一段用三项抛物线形式表示时,可以获得较准确的运动微分方程的解。

5. 图 13 上表示的是三相交流异步电机的机械特性。在该特性的稳定部份,有一小段可以用一直线段代替,这个直线段通过横坐标上的一点,及通过由转子额定角速度 $\omega_{\text{额定}}$ 和电机发出的额定力矩 $M_{\text{额定}}$ 确定的点。在此情况下,近似的机械特性可用下式表示:

$$M_{\text{驱动}} = M_{\text{启动}} - \frac{M_{\text{额定}}}{\omega_{\text{同步}} - \omega_{\text{额定}}} \omega, \quad (7)$$

式中: $M_{\text{启动}}$ ——当角速度等于零时,发动机所发出的假定力矩;

$\omega_{\text{额定}}$ 及 $M_{\text{额定}}$ ——额定角速度及额定力矩;

$\omega_{\text{同步}}$ ——当电动机内既没有载荷,也没有损耗时,在理想的空转情况下的同步角速度。