

GONGCHENG
JIXIE
DONGLIXUE
JICHU

汪铁民 编著

唐经世 主审

工程机械动力学基础

13

中国铁道出版社

内 容 简 介

本书主要讨论了以下几个问题：一、有关工程机械动力学的基本概念和研究方法；二、传动系统和金属结构在工作时的动载荷；三、发动机特性和工作装置特性的综合问题；四、一些典型部件和液压装置工作过程中的动力学问题。

本书还介绍了：一、机械—地面力学和随机振动的一些基本知识；二、有关进行动力测定的问题；三、一些典型传感器的工作原理和使用的条件。

本书可作为工程机械专业本科学生的教学参考书，也可供工程机械行业的科技人员和有一定文化水平的工人参考。

前 言

关于建立“工程机械动力学”这门课程的设想，早在一九五四年唐山铁道学院筹建筑路机械专业的过程中就逐步形成了，首次讲授，是作为西南交通大学机械系工程机械专业七七级学生的选修课程。

这次出版，是作为工程机械专业本科学生的参考书编写的。限于篇幅以及作者的学术水平，不可能对工程机械动力学的各个领域都进行全面而且深入的讨论。因此，本书定名为《工程机械动力学基础》。

在编写本书的过程中，承蒙西南交通大学倪志镭教授和唐经世、沈权二位副教授热情鼓励 and 大力支持，谨在此向他们表示由衷的感谢。作者也热诚欢迎广大读者对本书提出各种批评和建议，俟机修订。

作 者

一九八四年二月于四川峨眉

目 录

第一章 基本概念	1
第一节 工程机械动力学的研究对象与方法	1
第二节 工程机械工作过程中的动力现象	3
第三节 动力装置和工作装置的特性	6
第四节 机器的计算简图	9
第五节 动力学研究中的图解方法	27
第二章 传动装置的动力学问题	35
第一节 传动装置的计算简图	35
第二节 构件的惯性对传动装置工作的影响	38
第三节 构件的弹性对传动装置工作的影响	42
第四节 间隙对传动装置工作的影响	49
第三章 发动机和工作装置特性的综合	59
第一节 $M_o(\varphi)$, $M_e(\varphi)$ 和 $J(\varphi)$ 的综合	59
第二节 $M_o(\omega)$, $M_e(t)$ 和 $J = \text{常数}$ 时的综合	64
第三节 $M_o(\omega)$, $M_e(\varphi)$ 和 $J(\varphi)$ 的综合	69
第四章 几种典型机构的动力学研究	76
第一节 摩擦离合器	76
第二节 差速器	79
第三节 行星轮系的传动机构	88
第五章 减振和激振装置	93
第一节 弹簧减振装置	93
第二节 动力减振装置	100
第三节 惯性激振装置	102
第六章 金属结构工作时的动力现象	104
第一节 计算简图	104

第二节	金属结构的刚度系数和换算质量	105
第三节	机器的起升机构和金属结构 共同工作时的动力现象	109
第七章	工程机械行驶时的动力学问题	117
第一节	滚动阻力	117
第二节	牵引力	125
第三节	全轮驱动时的寄生功率	131
第四节	工程机械的通过性能	133
第八章	随机振动基础	137
第一节	基本概念	137
第二节	随机振动的统计特性	141
第三节	传递函数	154
第九章	液压装置的动力学问题	156
第一节	液流速度变化时产生的附加压力	156
第二节	液体的可压缩性问题	158
第三节	水锤效应	161
第四节	液压装置加速度、速度、位移 和动作时间的计算	162
第十章	动力测定	167
第一节	动力测定的目的和任务	167
第二节	动力测定的基本方法	168
第三节	机械式测定仪器	170
第四节	电气测量所用的传感器和基本电路	174
参考文献		183

第一章 基本概念

第一节 工程机械动力学的研究 对象与方法

工程机械是机械制造业中历史较短而发展很快的一个行业。由于基本建设规模的扩大和对建筑工程机械化的进一步要求，已经研制出许多类型和型号的机械。

通常工程机械可以分成八大类：（1）挖掘机械；（2）铲土运输机械；（3）工程用起重运输机械；（4）桩工机械；（5）压实机械；（6）公路路面机械和铁路线路机械；（7）凿岩机械和风动工具；（8）钢筋混凝土机械。这是一个庞大的“家族”。而随着建筑施工工艺的发展，还会不断有新的机械出现。此外，工程机械在技术上的发展也很迅速，各种新型的传动装置、液压和液力技术、电子技术、自动控制和远距离操纵技术、激光和红外技术以及各种新型的材料也大量而迅速地被应用在工程机械上。与此同时，工程机械的功率和速度也在不断提高，例如卡特彼勒公司出品的D-10推土机，功率已达700马力；而该公司出品的660B自行式铲运机，其最高行驶速度也已达每小时70公里。

从发展的历史上看，机器的理论经历了以下几个阶段。开始，机器只是某些“能工巧匠”适应生产的需要而“创造”出来的，并没有系统的理论和设计方法。设计机器的过程主要依赖设计者本人的经验及技巧。随着社会生产的发展，大量机器出现以后，开始形成所谓“机器的科学”——机器学。作为机器科学理论的基础是各个力学的分支。在英语中机器学和力学实际上是一个词：mechanics。因此可以认为力学正是在对机器各个方面进行研究的过程中发展起来的。而力学的发展则又使机器的设计得

以从纯粹的“创作技巧”中摆脱出来而有了一定的“理论根据”。然而，迄今为止，在设计新机器时往往不得不或多或少要应用“经验设计”或所谓“类比设计”的方法，亦即参考现有类似的机械的结构形式、甚至尺寸来进行设计。当然，由于科学和技术有其“继承性”，脱离现有的经验，所谓“纯理论”的设计是不存在的。但是，由于人们对机器工作过程中发生的许多现象缺乏深入的了解，不得不在缺乏充分根据的情况下来决定设计方案和机器构件的尺寸。从而，使机器变得笨重，材料也不能充分利用。随着机器功率和速度的增大，对节约能源及原材料利用等方面的进一步要求，以及对不断改善机器性能的需要，都迫使人们对机器工作过程中的动力现象要有深入的了解，这也就是各门“机器动力学”产生的背景。

“工程机动力学”所要研究的内容有以下几个方面：

- (1) 研究工程机械与其工作对象及环境之间的相互作用。例如，铲土运输机械与土壤及地面之间的相互作用；
- (2) 研究工程机械在工作过程中由于惯性、冲击和振动而产生的动力载荷；
- (3) 研究工程机械各个组成部分：发动机、传动装置和工作装置之间的相互作用和性能的匹配问题；
- (4) 工程机械在运行和工作过程中稳定性的研究；
- (5) 工程机械操纵控制系统对机械的工作性能及动力载荷的影响；
- (6) 工程机械上的一些典型部件，如离合器、制动器、差速器、万向节等，其工作过程以及这些部件对机器性能、动力载荷的影响；
- (7) 液压装置和液力传动的动力学问题；
- (8) 进行动力测定的方法和技术手段。

这八个方面可以在一定程度上反映出工程机动力学的基本任务。应该说有些问题目前研究得还不全面，而有些问题则发展得很快，已经形成一门独立的学科。例如研究工程机械与土壤及

地面间的相互作用的问题在目前已形成了一门称为“工程机械地面力学”的学科。

一般说来，工程机械动力学的研究方法可以分成理论研究和实验研究两个方面。显然，这两个方面是相辅相成的。

理论研究的方法可以归结为将所研究的对象抽象为某种数学-物理模型。然后通过对该模型的分析 and 计算就可以得出一个具有普遍性的结论。然而实践表明，即使是比较简单的模型，要建立相应的方程式并进行求解都会遇到很大的困难。这就迫使在研究时要作进一步简化的假设，这样所得出的结果误差就比较大，而只能得出近似的、概括性的结论。

实验研究的方法则是在样机或缩尺模型上利用一定的仪器对处于一定的工作条件——工况下的机器或模型进行测定。根据测定的结果可以分析机器在设计时所采用的假设和方案是否合理，找出机器中的薄弱环节和设计上不合理的地方，从而进一步改进机器的结构。

近年来，由于电子计算机技术和各种测试新技术的发展，人们可以利用电子计算机进行一些依靠人力难于进行或者无法进行的计算和分析。此外，还能利用和测试仪器对接的分析仪器和电子计算机直接而迅速地处理大量数据，并且可以在荧光屏上将结果显示出来。这样，使得理论研究和实验研究都提高到一个新的高度，从而使得两方面的研究得以更紧密地结合起来，大大推动了工程机械动力学的发展。

可以认为，要发展我国的工程机械行业，应当大力加强对机器的研究工作。只有对研究工作给予高度的重视，才能摆脱单纯模仿国外产品的局面。在对引进的技术认真消化的基础上，结合我国的具体条件，可以创造出具有中国特色、高效率、低成本的新型工程机械。

第二节 工程机械工作过程中的动力现象

任何一台完整的机器都包括三个基本的组成部分：动力装

置、传动装置和工作装置。

动力装置实质上是一个“换能装置”。它将其它形式的能量（电能、热能、化学能等等）以一定的方式转换成机械能。例如，发动机的机械能通常以曲轴输出的扭矩和转速体现出来。

传动装置的作用是将动力装置的机械能传递给工作装置，并且使工作装置具有一定的力参数（力、扭矩等）和运动参数（位移、速度和加速度等），以适应机器工作过程的要求。同时，传动装置还使得动力装置和工作装置之间具有一定的空间，便于工作装置进行工作和操纵-控制系统的布置。

工作装置直接用来完成预定的工艺过程（如挖掘土壤、搅拌混凝土，开凿岩石以及起升重物等等）。

对工程机械来说，还有一些辅助装置。例如操纵控制系统、走行装置等。可以利用这些装置来控制机器的动作，变动机器的位置等。在一定的条件下，这些装置的性能对机器的工作效果和运转性能也会发生很大的影响。例如，当操纵控制系统设计得不合理或者调整不当时，就会在传动装置中引起很大的动力载荷，甚至造成机械损坏和事故。

将一台机器看作由上述各个部分所组成的一个复杂的系统时，研究各个组成部分之间的相互作用特点及其变化规律的问题就显得十分重要。因为一个系统各个组成部分——子系统之间性能的正确匹配对充分发挥整个系统——机器的效能是具有重大意义的。

将机器看作一个系统时，研究该系统和外界环境之间的相互作用也是十分重要的。例如，推土机的工作能力不仅和铲刀与被它切削的土壤之间相互作用的特性有关，而且还和推土机走行装置和地面之间相互作用的特性有关系。当附着力不够时，即使推土机的发动机具有很大的功率，仍旧不能产生足够的牵引力来推动铲刀进行工作。同样，当铲刀设计得不完善或者它的安装角度不符合土壤性能的要求时，推土机的牵引力也不能得到有效的利用。这些问题都是不难理解的。

机器要进行工作就必须运动。在机器起动时首先要克服机器上各个运动构件的惯性，即使机器在稳定运转时，有些构件中仍然会因运动状态的变化而产生加速度，这时就会有附加的惯性力。发动机必须能够克服这些惯性力。有时惯性力还会引起不利于机器正常工作的“晃动”和“震动”。

此外，机器的构件总是有一定的弹性的。因此当有变化的力或扭矩作用在构件上时就会引起振动。振动使机器的构件承受附加的交变应力，使它产生疲劳损坏，并且还影响机器运转的平稳性。

但是在有些机器上则要利用振动来进行工作。例如振动压路机和铁路用的道碴捣固机等。在这种情况下必须对机器其余部分进行隔离，使振动的作用有效地传递给加工对象。

实践表明，机器工作时的振动和噪声还会使操纵人员迅速疲劳，这也会影响机器效能的发挥。在严重时还会引起错误的操作，肇成事故。振动和噪声还会对操纵人员的健康造成不良的后果。

近年来，操纵机器的人和机器之间的相互关系日益引起人们的重视。要充分发挥一台机器的效能不能离开操纵机器的人的素质和技能。而从另一个角度出发，机器的设计也应当尽量满足机器操纵者在生理上和心理上的特点，保证能充分发挥人的作用和保障人的舒适与健康等等。因此，从这个观点看来，应当研究人-机器-环境这一个系统的性能和特点。这就是所谓《人机工程学》所研究的课题。因此，在研究机器的动态性能时也应当从人机工程学的观点出发考虑问题，务必使机器的动态性能符合人机工程学的要求。

许多工程机械要在越野条件下行驶和工作。因此，它的工作能力和它与地面之间的相互作用——牵引力的产生及发挥有很大关系。工程机械在越野条件下行驶时，由于受到地面对它的随机性外力的干扰，又产生了所谓行驶的平稳性问题。

液压和液力技术在工程机械上的广泛应用也产生了一系列新

的动力学课题。例如，管路系统的振动、液力冲击以及整个液压和液力系统动态特性的分析和研究等等。

综上所述，研究工程机械工作过程中的各种动力学现象具有很重要的意义。但是，建立一个完整的“工程机械动力学”的理论体系还仅仅处于开始阶段，还有许多工作有待于完成。

第三节 动力装置和工作装置的特性

动力装置和工作装置的特性又称为“机械特性”或“工作特性”。它指的是发动机和工作装置的力参数和运动参数之间的函数关系。一般可以用图线的形式将特性表示出来，故又称为“特性曲线”。发动机和工作装置的特性曲线可以由理论分析或实验的方法得到。各种发动机的特性曲线的典型曲线可见图 1—1。

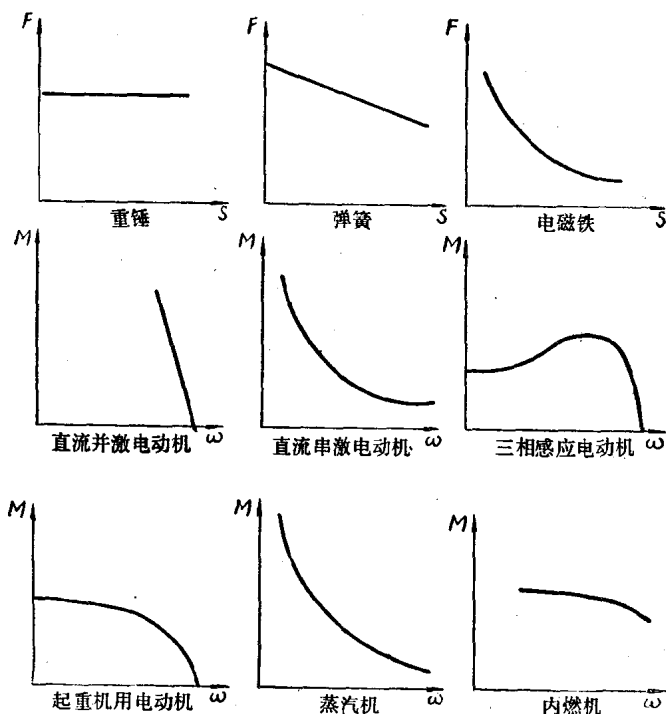


图 1—1 各种特性曲线举例

评价特性曲线的指标是“刚度”和“过载性能”。特性曲线的刚度可以用特性曲线上某一个特定点的切线和横坐标间夹角的正切值来表示（见图1—2）。刚度越大表示在给定的工况范围里载荷发生变化时，发动机的角速度变化越小。由图1—1可见，直流并激电机特性曲线的刚度比内燃机大。由于内燃机特性曲线的刚度不足，因此在用内燃机驱动的车辆上就要安装变速箱。因为内燃机只能在载荷变化不大的工况条件下工作，利用变速箱就可以在在一定程度上做到在车辆的变速范围内使“转化”到发动机主轴上的阻力扭矩大体上保持不变，使发动机能够正常工作。应用附加的装置，如安装调速器、液力变矩器等，能够在一定程度上改变发动机的特性。

过载性能又称作“扭矩储备系数”，是发动机的最大扭矩对额定扭矩的比值。它表示了发动机克服过载的能力。在选用工程机械的发动机时应当根据机器的工况而对发动机的过载性能提出一定的要求。

在一般情况下，我们只用力（或扭矩）和速度（或转速）的函数关系来表示特性曲线。但是实际上情况却要复杂得多。例如，电动机的扭矩不仅和转子的角速度有关，而且还和转子的角加速度有关。只不过为了简化起见往往将后者忽略而已。

工作装置的特性曲线通常也用力参数和运动参数间的函数关系来表示，它和机器所要完成的工艺过程特点及所加工对象的特性有关。在一般情况下可以分成五大类：（一）力参数是常数（例如起重机的起升机构）；（二）力参数只是速度的函数（例如离心泵、通风机等）；（三）力参数只是位移的函数（例如推土机和铲运机）；（四）力参数同时是位移和速度二个运动参数的函数（例如高速度的皮带输送机）；（五）力参数是时间的函数（例如碎石机、球磨机等）。研究各种机械工作装置的特性是各门专业课程的主要课题之一。

当用解析方法研究动力学问题时，往往要求将发动机和工作装置的特性用一个不太复杂的数学表达式表示出来。因为将机构

的运动微分方程式进行求解并得到其通解就可以确定机构参数的变化规律。但是如果特性是一个复杂的函数时，就不得不改用图解法或数值解法来解微分方程。在这种情况下就只能得到一个具有局限性的解答而无法据此作出一般性的结论。当在实际的工作条件下不需要使用全部的特性曲线时，我们可以用一条直线或一条抛物线来表示要使用的那一段特性曲线，这样将会使问题大为简化。

图 1—2 为一台三相感应电动机的特性曲线。它的工作部分只是在最大扭矩右边刚度很大的那一段。所以我们可以用一条通过额定工作点和空载点的直线来表示它的特性曲线。该直线的方程式为：

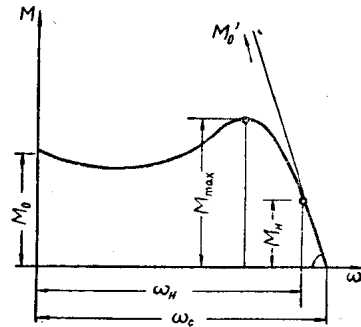


图 1—2 三相感应电动机的特性

$$M = M'_0 - M_H \frac{\omega}{\omega_c - \omega_H}$$

式中 M ——发动机的扭矩（变量）；

ω ——发动机的转速（变量）；

M'_0 ——假定当 $\omega = 0$ 时的扭矩；

M_H ——额定扭矩；

ω_H ——额定转速；

ω_c ——空载（同步）转速。

如果该电动机的 $M_H = 475$ 牛米； $\omega_H = 102.8$ 秒⁻¹； $\omega_c = 104.6$ 秒⁻¹（这些数据可以由相应的手册查到）。

当 $\omega = \omega_c$ 时， $M = 0$ 。根据这个条件可得出：

$$M'_0 - M_H \frac{\omega_c}{\omega_c - \omega_H} = 0$$

将数据代入后可求出：

$$M'_0 = M_H \frac{\omega_c}{\omega_c - \omega_H} = 475 \times \frac{104.6}{104.6 - 102.8} = 27600 \text{ 牛米}$$

由此可以得出:

$$M = 27600 - 264\omega$$

图 1—3 为一种起重机专用的电动机特性, 显然, 在这里不宜用直线来表示, 我们可以用一条抛物线来作近似的表示:

$$M = a + b\omega + c\omega^2$$

在图上取三个点:

$$M_1 = 10 \text{ 牛米} \quad \omega_1 = 100 \text{ 秒}^{-1}$$

$$M_2 = 100 \text{ 牛米} \quad \omega_2 = 52 \text{ 秒}^{-1}$$

$$M_3 = 145 \text{ 牛米} \quad \omega_3 = 0$$

将数据代入后得出下面的方程组:

$$\begin{cases} a + 100b + 10000c = 10 \\ a + 52b + 2704c = 100 \\ a = 145 \end{cases}$$

解此方程组可求出: $a = 145$, $b = -0.3401$ 和 $c = -0.0101$ 。

将 a 、 b 及 c 的数值代回原方程式, 便可求出特性曲线的方程式为:

$$M = 145 - 0.3401\omega - 0.0101\omega^2$$

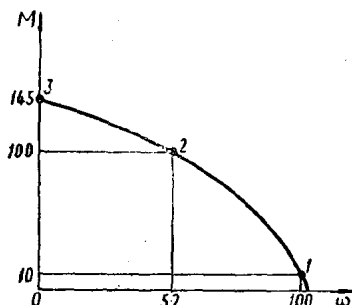


图 1—3 起重机用电动机的特性

第四节 机器的计算简图

一、计算简图

每一台机器都可以看成是一个用各种分布参数和集中参数表征的复杂力学系统。这些参数是一些用来描述机器构件物理特性和对机器构件的运动产生影响的物理量。例如, 构件的质量、转动惯量、弹性(刚度)、运动副中的摩擦力、驱动力和工作阻力等等。在原则上可以对机器的每一个构件列出一组相应的微分方

程式，然后进行求解。但是在实践上却有很大的困难，甚至无法求解。为了能够进行研究，必须将这个复杂的系统根据一定的原则进行简化。这种简化包括将某些分布参数用集中参数来代替、忽略某几个构件或者忽略一些构件的某几个参数等等。这种简化后的系统图形叫做计算简图。

这种简化（或称为换算）在实质上就是设法求得一个和所研究的系统“等价”的系统。举例说明如下。

图 1—4 (a) 所示为机械式单斗挖掘机的起升机构。发动机通过传动装置驱动绞车的卷筒，而卷筒通过钢丝绳将挖斗提升。当研究钢丝绳中的载荷时，可以将它简化为图 1—4 (b) 所示的计算简图。由图可见这个系统实际上就是一个单自由度的有阻尼振动系统。

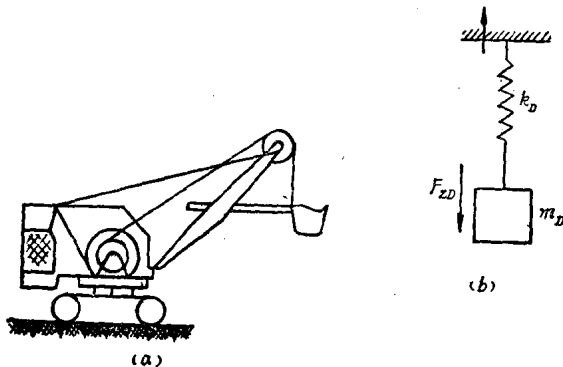


图 1—4 机械式单斗挖掘机简图

图中的符号分别为：

m_D ——换算质量（包括顶部滑轮和挖斗及部分斗柄在内的换算质量）；

k_D ——钢丝绳的换算刚度系数；

F_{zD} ——系统中阻尼力的换算值。

由上面可以看出，在换算时有一个向系统中哪一点进行换算的问题，亦即所谓选取一个“换算中心”的问题。换算中心一般根据求解的目的和计算上方便与否来选取。

任何系统在进行换算时一共有三种物理量：质量（转动惯量）、刚度、阻力和作用力（力矩）。

二、进行换算的方法和原则

在进行换算时首先选择一个点（换算中心）或一个构件（换算构件），再将需要进行换算的诸物理量按照一定的原则换算到这个点或这个构件上来。

质量（转动惯量）和刚度在整个系统的运动状态发生变化时体现为动能（对质量而言）和势能（对刚度而言）的变化；而作用力（包括阻力）和力矩则体现为作功（正功或负功）的大小。所以换算的原则就应该是换算前后系统的动能和势能保持不变；作用力（包括阻力）在系统运动状态发生变化时所作的功大小也不变。

有时为了简化，可以根据具体的情况，忽略一些次要的因素。例如，对集中质量而言其弹性相对来说由于变形很小就可以略去不计；而弹性元件（例如轴），其质量相对来说也较小，因此也可以略去不计等等。

实际的机械系统根据其运动的形式可以分成三类：直线运动、旋转运动以及直线运动和旋转运动同时存在的复合运动。所以，当换算时也可以根据需要，将系统按上述三种形式进行换算。换算力（力矩）、换算质量（转动惯量）和换算刚度系数也可称为等效力（力矩）、等效质量（转动惯量）和等效刚度系数。

三、力和力矩（扭矩）的换算

力和力矩（扭矩）的换算根据“可能位移原理”进行。这个原理又称为“虚位移原理”。根据这个原理，认为作用在机器各个构件上的外力，当其作用点有一微小的、可能的位移时，各外力所作功的总和应当等于换算力在相应的可能位移方向所做的功。

实用上为方便起见，也可以用单位时间内所做的功——功率来进行计算。对于大多数的机器来说，其机构均是单自由度的系统。在这种情况下可能位移和实际位移的方向是相同的。因此，对作直线运动的系统，任意一个作用力 F_j 的功率 N_j 可以表示为：

$$N_j = F_j v_j \cos \alpha_j \quad (1-1)$$

式中 v_j —— F_j 力作用点的速度；

α_j —— F_j 力和 v_j 速度方向之间的夹角。

同样，对作旋转运动的系统，任意一个扭矩 M_j 的功率 N_j 也可以表示为：

$$N_j = M_j \omega_j \quad (1-2)$$

式中 ω_j ——相应构件的角速度。

如果用 F_D 表示换算力， v_D 表示换算中心或换算构件的速度； M_D 表示换算扭矩， ω_D 表示换算构件的角速度。分别可以表示如下：

$$F_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{1}{i_j} \quad (1-3)$$

$$M_D = \sum_{j=1}^n M_j \frac{1}{i_j} \quad (1-4)$$

式中 i_j ——传动速比， $i = \frac{v_D}{v}$ 或 $i = \frac{\omega_D}{\omega}$ 。

对于作复合运动的系统也可以根据需要而定，换算成作直线运动的系统或作旋转运动的系统：

$$F_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{v_j \cos \alpha_j}{v_D} + \sum_{j=1}^n M_j \frac{\omega_j}{v_D} \quad (1-5)$$

$$M_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{v_j \cos \alpha_j}{\omega_D} + \sum_{j=1}^n M_j \frac{\omega_j}{\omega_D} \quad (1-6)$$

因为引入摩擦力后在计算上会造成很大困难，所以往往用机构的传动效率 η 来考虑摩擦力的影响。传动效率 η 的值可以参照