

电动机调速的 原理及系统

杨兴瑶 编 著

水利电力出版社

内 容 简 介

本书较全面系统地叙述了电动机调速系统的原理、特性和组成。介绍了从直流发电机—直流电动机调速系统到目前工业中广泛应用的各种直流电机与交流电机调速系统。此外,对晶体管控制电动机以及数字调速系统(直流电机、步进电机)也作了一定的介绍。全书共分十四章。

本书对从事电力拖动及工业自动化的设计、运行工作的技术人员和工人有较好的参考价值;也可供大专院校自动控制专业有关师生参考。

电动机调速的原理及系统

杨兴瑞编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 18印张 476千字

1979年8月第一版 1985年11月北京第二次印刷

印数32681—38260册 定价3.95元

书号 15143·3496

前 言

电力工业和其它工矿企业、农用机械、尖端技术以及国防武器系统都广泛地使用电机及电力拖动技术，都需要各种各样的自动控制设备。其中电动机调速系统又是应用比较广泛的一种控制系统。比如在生产中加工一定的零件、完成某一特定的生产自动线以及实现整个车间或工厂的自动化等等，往往需要几台、几十台甚至几百台的电机。因此，电动机的控制问题就显得很重要了。

本书主要介绍各种电动机调速的原理、方法、特性及系统的组成，重点偏重于原理说明和特性分析上。分析稳态特性采用机械特性方程式，分析动态特性采用自动调节原理中的传递函数法。此外，为了更好地理解这些调速方法的应用，书中介绍了一些典型系统的构成方案，这些系统有些已在生产中应用，有些还在不断发展完善。特别需要指出的是，由于近一、二十年电子技术和控制理论的飞跃发展，“电动机的调速”已形成了由电子功率元件（主要是可控硅）与自动控制技术相结合的新领域，要想在一本书中全面地介绍这些内容是比较困难的。因此，本书的目的是把现今电动机调速发展的概貌介绍给读者，书中并未深入探讨某一种具体系统中的很多具体问题。特别是有关电动机控制的其它问题（如可控硅触发电路、起动及保护设备、继电控制与顺序控制等）以及具体实例线路，请读者参阅其它有关书籍及资料。

全书共分十四章。第一章概论，扼要介绍电机及拖动理论中的电、磁、力基本定律以及调速的基本概念和指标；第二至第六章为直流电动机调速，其中第二章介绍直流电动机的稳态特性、动态特性以及基本调速方式；第七至第十二章为异步电动机调

速，其中第七章介绍异步电动机的基本特性和调速方式；最后两章为同步电动机类型的调速系统：无换向器电动机及步进电机系统。最后附有各种电动机调速性能的比较以及常用单位及换算公式等附录，以备选择调速方案和分析计算时参考。

本书原稿曾请清华大学陈禹六和北京航空学院郇学礼等同志审看，承蒙提出许多宝贵的意见。此外，华东工程学院朱宗正、汪海棠、杨成梧、付冲及俞天锡等同志又分别就有关内容提出了许多具体意见，刘玉等几位同志为本书精心绘制了插图。改写时还曾得到天水电气传动研究所徐沛林等同志的帮助，对以上诸同志及有关方面的大力协助和支持谨在此表示深切地感谢。

本书第五章第一节及第十四章第一、二节等内容曾参考了清华大学及北京工业学院的有关教材。在编写过程中还参阅了北京钢铁学院、同济大学、武汉钢铁学院、南京航空学院及天津电气传动设计研究所等单位编写的有关资料。

由于编写者水平及能力有限，加上目前国内这方面书籍较少，因此书中缺点和错误在所难免，欢迎读者提出批评指正。

作 者

一九七九年二月于南京

目 录

前 言

第一章 概 论	1
第一节 电机理论中的两个基本定律及其联系	1
一、电磁感应定律和电磁力定律； 二、机—电能量变换的可逆性	
第二节 电动机运行的力学基础	5
一、力学物理量单位及主要关系式； 二、转矩—转速特性——机械特性； 三、电力拖动系统的运动平衡方程式； 四、电力拖动系统的稳定运行条件	
第三节 电动机调速的基本概念和指标	18
一、调速的必要性； 二、调速的分类； 三、调速的性能指标	
第二章 直流电动机的特性和基本调速方式	28
第一节 直流电动机的工作原理、稳态特性和运转状态	28
一、直流电动机的工作原理和稳态特性——机械特性； 二、机械特性与运转状态	
第二节 直流电动机的基本调速方式及其调速特性	40
一、基本调速方式； 二、三种基本调速方式的特性及其物理实质	
第三节 直流电动机的动态特性	59
一、电枢电压突变时的过渡过程； 二、励磁磁通突变时的过渡过程	
第三章 直流发电机—直流电动机($F-D$)系统与交磁放大机—直流电动机($ZKK-D$)系统	79
第一节 直流发电机—直流电动机($F-D$)系统	80

一、系统的组成；	二、系统的运行原理	
第二节	交磁放大机—直流电动机 ($ZKK-D$) 系统	84
一、交磁放大机的工作原理和特性；	二、交磁放大机—直流电动机系统的组成	
第三节	$F-D$ 系统和 $ZKK-D$ 系统的动态特性	101
一、直流发电机—直流电动机系统的传递函数和动态特性；	二、交磁放大机—直流电动机系统的传递函数和动态特性	
第四章	可控硅整流器—直流电动机 ($SCR-D$) 系统	111
第一节	可控硅整流器的工作原理及基本整流电路	111
一、可控硅整流器的简单工作原理和伏安特性；	二、基本整流电路	
第二节	$SCR-D$ 系统的机械特性	130
一、可控硅整流器带动反电势负载时的电路特点；	二、电流连续时 $SCR-D$ 系统的机械特性；	
三、电流断续时 $SCR-D$ 系统的机械特性		
第三节	有源逆变的概念及制动时的机械特性	151
一、有源逆变的概念；	二、电动机在发电状态时的机械特性	
第四节	可逆整流电路、电动机的可逆运转及其系统组成	161
一、可逆整流电路；	二、 $SCR-D$ 可逆系统及其机械特性	
第五节	$SCR-D$ 系统的传递函数和动态特性	172
一、可控硅整流器的传递函数；	二、 $SCR-D$ 系统的传递函数和动态特性	
第五章	$SCR-D$ 自动调速系统的结构及电子最佳化方法	177
第一节	$SCR-D$ 自动调速系统的结构	177
一、工作机械对自动调速系统的要求；	二、 $SCR-D$ 自动调速系统构成的基本方式——双闭环不可逆调速系统的组成；	
三、电枢反向的 $SCR-D$ 可逆自动调速系统；	四、自动弱磁调速及磁场反向的可逆调速系统	
第二节	$SCR-D$ 自动调速系统各环节的选择和计算	209

- 一、系统各主要环节的选择； 二、SCR-D自动调速系统的
参数计算

第三节 电子调节器最佳化方法.....230

- 一、最佳化条件； 二、二阶系统的标准结构形式；
三、关于小时间常数之和的概念； 四、二阶最佳化；
五、三阶系统的标准结构形式及其最佳化； 六、二阶最
佳化与三阶最佳化的比较； 七、多环系统的最佳化

第六章 直流电动机的特殊调速方式270

第一节 晶体管放大器一直流电动机调速系统.....270

- 一、晶体管不可逆调速系统的线路； 二、晶体管可逆调速系
统的线路

第二节 直流电动机的脉冲调速.....282

- 一、脉冲宽度调制器一直流电动机调速系统； 二、可控硅脉
冲调速

第三节 数字调速介绍.....305

- 一、数字调速的原理和分类； 二、频率数字调速； 三、
频率-相位数字调速

第七章 异步电动机的运行原理和调速方式.....329

第一节 异步电动机的运行原理和机械特性.....329

- 一、异步电动机的运行原理和等值电路； 二、异步电动机的
电磁转矩和机械特性； 三、机械特性与运转状态

第二节 异步电动机的调速方式.....341

第八章 异步电动机的交流调压调速343

第一节 可控硅交流调压电路.....343

- 一、单相交流调压电路分析； 二、三相交流调压电路分
析

第二节 异步电动机的调压特性.....361

- 一、异步电动机调压时的机械特性； 二、异步电动机调压调
速时的损耗及容量的限制

第三节 异步电动机调压调速系统的组成与动态计算.....365

- 一、异步电动机调压调速系统的组成； 二、异步电动机调压调

速系统的动态计算

第四节 其它调速方法.....371

- 一、交流开关(脉冲)调速; 二、转子电路串联电阻调速和直流调阻调速;
- 三、两相及单相异步电动机的定子调压调速

第九章 异步电动机的变极调速和变极调压调速377

第一节 变极调速.....377

- 一、变极的原理; 二、变极的接线方式及其机械特性;
- 三、变极调速的应用范围

第二节 变极调压调速.....385

- 一、变极调压调速的工作原理; 二、变极调压调速系统的组成

第十章 异步电动机—电磁转差离合器调速系统397

第一节 电磁转差离合器—异步电动机调速系统的工作

原理和机械特性.....397

- 一、电磁转差离合器调速系统的组成和工作原理; 二、电磁转差离合器调速系统的机械特性

第二节 电磁转差离合器的传递函数.....401

第十一章 异步电动机的串级调速404

第一节 串级调速的原理和装置.....404

- 一、串级调速的原理; 二、串级调速的装置及运行

第二节 串级调速时的机械特性、传递函数及系统的组成.....410

- 一、串级调速时的机械特性; 二、串级调速时异步电动机的传递函数;
- 三、串级调速系统的组成

第十二章 异步电动机的变频调速417

第一节 变频调速的原理、特性和分类.....417

- 一、变频调速的原理和特性; 二、变频调速时的传递函数;
- 三、变频调速系统的分类

第二节 交—直—交变频调速.....427

- 一、逆变器的—般工作原理; 二、电压型及电流型变频调速系统

第三节 脉冲宽度调制型变频调速系统	454
一、问题的提出——各种调压方式的比较；	
二、脉冲宽度调制的方法；	
三、脉冲宽度调制型变频调速系统	
第四节 交—交变频调速	468
一、直接变频器的的工作原理；	
二、直接变频器中的环流；	
三、电压与频率控制；	
四、交—交直接变频调速与交—直—交变频调速的比较	
第十三章 无换向器电动机及其调速系统	480
第一节 无换向器电动机的原理和构造	481
一、无换向器电动机的基本原理；	
二、无换向器电动机的构造	
第二节 无换向器电动机的换流	492
一、自然换流法(反电势换流法)；	
二、断续电流法换流	
第三节 无换向器电动机的特性及调速方式	495
一、转速公式与基本调速方式；	
二、转矩公式与调速特性	
第四节 无换向器电动机的运行状态及调速系统	502
一、正反转控制及再生发电运行状态；	
二、无换向器电动机调速系统的组成	
第五节 其它型式的无换向器电动机	509
一、交流无换向器电动机；	
二、无刷电动机	
第十四章 步进电机及其系统	520
第一节 步进电机的类型和原理	521
一、步进电机的分类和基本原理；	
二、反应式步进电机的结构及其通电方式；	
三、励磁(永磁)式步进电机	
第二节 步进电机的控制装置	537
一、环形分配器；	
二、功率驱动电路	
第三节 步进电机的传递函数和动态特性	549
一、运动方程式与传递函数；	
二、过渡过程和动态特性	
第四节 步进电机的数字反馈	553
附录一 各种电动机调速方式及调速系统的比较	561
附录二 单位换算及常用公式	564

第 一 章

概 论

电机是进行电能与机械能变换的机器。这种变换与其它机器如液压机、气动机等能量变换方式不同，它还必须借助一种叫做“场”的特殊物质来实现。目前在电机中这种场主要是磁场。因此，我们所研究的电机应当理解为电磁机，我们在分析和使用电机进行调速时也就必须注意电、磁、机这三方面的问题。在电机中这三者通过一些基本定律互相联系，又通过一些表示为方程式的关系互相制约和转换。

下面我们首先简要叙述一下电机理论中的电磁力基本定律及其联系，然后介绍电动机运行的力学基础，最后分析有关调速的基本概念和性能指标。

第一节 电机理论中的两个基本定律及其联系

一、电磁感应定律和电磁力定律

电磁感应定律和电磁力定律是电机理论中最基本的两个定律，它们的内容是这样的：

1. 电磁感应定律 当与某一个线圈 AX （图 1-1）交链的磁通 Φ 发生变化时，在该线圈中将会产生与磁通对时间的变化率成比例的感应电势 e ，当线圈匝数为 1 时

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

式中负号表明，感应电势有反抗磁通变化的趋势。一般 Φ 是时间 t 和线圈与磁场相对位移 x 的函数，即 $\Phi(t, x)$ ，因此可以将式

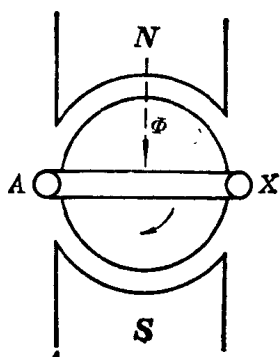


图 1-1 线圈在磁场中的作用

(1-1) 展开成

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Phi}{dt} \\ &= -\left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right] \end{aligned} \quad (1-2)$$

上式中的 e 可以分为两部分：

$$e_T = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-3)$$

称为变压器电势，一般的变压器就是根据这个原理构成的。

$$e_v = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} v = -\frac{d\Phi}{dx} v \quad (1-4)$$

称为速度电势，一般的电机就是根据这个原理构成的。在一般典型电机中磁场的大小及分布是不变的，而仅仅依靠磁场与线圈有相对位移来产生变化磁通和感应电势并进行能量交换。这样，我们就可以根据磁场与线圈相对运动的形式和组态的不同，将一般工业中最常见的电机分成下列三种基本类型：

直流电机——磁场（定子）大小及方向不变，线圈（电枢）转动；

异步电机——磁场（定子）大小不变方向在转动，线圈（转子）以小于磁场的速度旋转；

同步电机——磁场（转子）大小不变方向在转动，线圈（定子）不动。

尽管上述三种电机构成的原理不同，但有一个共同点就是，线圈与磁场要有相对运动，即式（1-4）中速度 $v \neq 0$ 。

通常为了分析方便，常用一根导体代替图 1-1 中的线圈，此时电磁感应定律可表示为

$$e = Blv \text{ (伏)} \quad (1-5)$$

式中 l —— 一根导体的有效长度 (米)；

B —— 磁感应强度 (韦伯/米²)；

v —— 导体在垂直于磁力线方向上的运动速度 (米/秒)。

2. 电磁力定律 通以电流为 i (安) 的导体在磁场中将要受到力的作用，力的大小为

$$f = Bli \quad (\text{牛顿}) \quad (1-6)$$

电磁感应定律中 e 、 B 、 v 的方向按右手定则确定，电磁力定律中 f 、 B 、 i 的方向按左手定则确定，如图 1-2 所示。

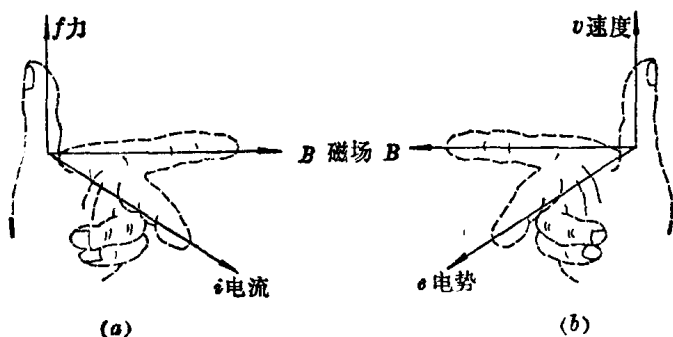


图 1-2 两个基本定律中各量方向的确定
(a)左手定则；(b)右手定则

二、机—电能量变换的可逆性

$e = Blv$ 定律和 $f = Bli$ 定律是联系机械与电磁关系的两个最基本定律，它们共存于机—电能量变换中，互相联系，互相转换。这一点可以从下述事实中进一步看出。

一台电动机输入电能，其中一根导体在电机内所具有的电功率为

$$e \cdot i = Blv \cdot i = Bli \cdot v = f \cdot v$$

即等于该导体所具有的机械功率；同样一台发电机输入机械能，其中一根导体在电机内所具有的机械功率为

$$f \cdot v = Bli \cdot v = Blv \cdot i = e \cdot i$$

即等于该导体所具有的电功率。

由此看来，在电机内部电功率与机械功率是平衡的，功率流

动的方向取决于外来的作用。当一台发电机的一根导体〔在图1-3(a)中以大圆表示〕在外力 $f_{\text{外}}$ 作用下向左方移动时，若磁场 B 的方向自上而下，则由右手定则可可知感应电势方向为流出纸面（我们以 $\cdot$ 号表示流出），如果有通路则有与发电机电势相同方向的电流流出。与此同时，载流导体在磁场中又受有电磁力的作用，根据左手定则可以判定此力 $f_{\text{反}}$ 是反抗运动的，故称反力。但是，若外加一个电压迫使电流反向〔图1-3(b)中电流流入，我们以 $\times$ 号表示流入〕，则电机将产生力 f 使导体向左方运动，由电磁感应定律可知，在导体中将产生电势，此电势与电流方向相反，故称反电势，此时导体成为电动机了。

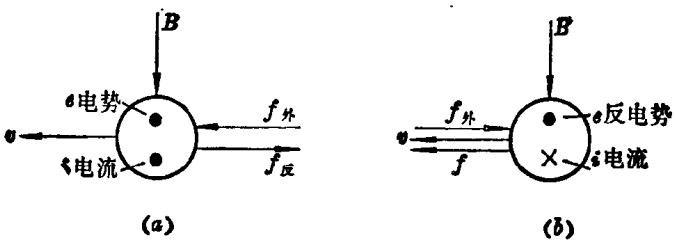


图 1-3 发电机与电动机的转化
(a)发电机的导体；(b)电动机的导体

由此可见，一台发电机在一定的外界条件下可以转化为电动机运行。同样，一台电动机在一定的外界条件下也可以转化为发电机运行。这一性质称为电机的可逆性原理。

不仅电机可以可逆使用，而且就是在同一台电机中发电机作用和电动机作用也都是同时存在的，所不同的是看那一种作用处于主导地位。在发电机中，发电机的作用是主要的，见图1-4(a)，电动机的作用（产生反力）是第二位的；在电动机中，电动机的作用是主要的，见图 1-4(b)，发电机作用却是第二位的。

但是上述关系又不是一成不变的。在一定的条件下，发电机作用和电动机作用的主次地位又可能互换，这就是电机可逆性原理的两种含义。

电动机在运转过程中常常会转化为发电状态和制动状态（制

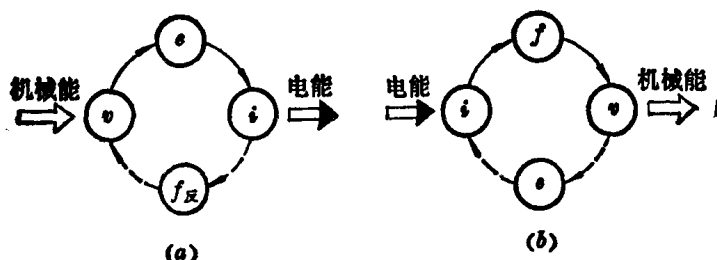


图 1-4 电机中两种作用的示意图

(a)发电机; (b)电动机

动状态也是一种发电状态)，其原因就在于此。

第二节 电动机运行的力学基础

上面我们简要复习了两个基本电磁定律，但是在研究电力拖动和调速问题时，不仅会遇到电磁力之间转换关系的问题，也常常会遇到各种机械问题，因此下面有必要概述一下力学基础知识，以便了解各物理量的基本单位和换算公式以及与机械运动有关的一些问题。

一、力学物理量单位及主要关系式

在单位制方面，一般在电工上习惯于采用米·千克·秒(MKS)单位，在机械上采用工程(重力)单位，因此在研究电机运行和调速问题时最常采用的是混合单位。大家知道，在MKS单位制中，长度是米，质量是千克(公斤)，时间是秒；但在重力单位中，长度是米，时间是秒，力的单位是公斤力。这时一公斤力相当于使一千克质量的物体产生重力加速度 $g=9.8$ 米/秒² 时具有的力，即

$$1[\text{公斤力}] = 9.8[\text{千克} \cdot \text{米}/\text{秒}^2] = 9.8[\text{牛顿}]$$

以此为出发点，下面再分别总结一些常用的力学物理量及其单位。

1. 力和转矩

力 f 的单位是公斤力、牛顿和达因，它们间的关系如下：

$$1[\text{公斤力}] = 9.8[\text{牛顿}] = 9.8 \times 10^5[\text{达因}] \quad (1-7)$$

转矩又称力矩，为力 f 与力臂 r （支点至力的作用线的垂直距离）的乘积：

$$M = fr \quad (1-8)$$

如果同时有几个力围绕同一点作用在同一个物体上时（见图1-5），则总的转矩 M 为各转矩的代数和，即

$$\begin{aligned} M &= M_1 - M_2 - M_3 \\ &= f_1 r_1 - f_2 r_2 - f_3 r_3 \end{aligned}$$

若 $M > 0$ ，其方向同 M_1 的方向，见图1-6(a)；若 $M < 0$ ，

则其方向与 M_2 或 M_3 相同，见图1-6(b)。

转矩的单位为：

$$\begin{aligned} 1[\text{公斤力} \cdot \text{米}] &= 9.8[\text{牛顿} \cdot \text{米}] \\ &= 9.8 \times 10^7[\text{达因} \cdot \text{厘米}] \end{aligned}$$

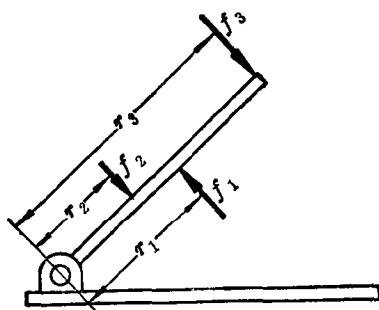


图 1-5 转矩的概念

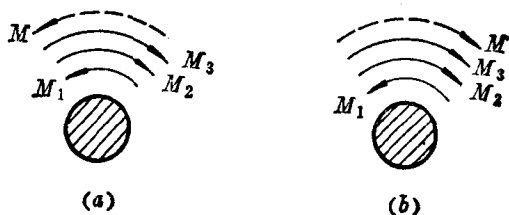


图 1-6 转矩的方向

(a) M 与 M_1 方向相同，(b) M 与 M_2 方向相同

2. 距离和角度

距离 l 常以米作单位，角度 θ 常以度、弧度和转为单位：

$$1[\text{转}] = 360^\circ = 2\pi \text{ 或 } 6.28[\text{弧度}]$$

3. 速度、角速度和转速

速度 v 常以米/分作单位，有时也用米/秒和千米/小时作单位，此时有

1[米/分] = 1/60 或 0.0167[米/秒] = 60/1000 或 0.06[公里/小时]

角速度 Ω 单位为弧度/秒，转速（数） n 的单位是转/分：

1[转/分] = 1/60[转/秒] = $2\pi/60$ 或 0.1047[弧度/秒]

显然，角速度 Ω 与转速 n 有如下关系：

$$\Omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (1-9)$$

4. 加速度和角加速度

加速度和角加速度分别为速度和角速度对时间的变化率，单位是

1[(米/分)/秒] = 1/60 或 0.0167[米/秒²]

1[(转/分)/秒] = $2\pi/60$ 或 0.1047[弧度/秒²]

5. 质量、转动惯量和飞轮惯量

质量 m 的单位是千克或公斤力·秒²/米。转动惯量 J 是衡量旋转物体惯性大小的物理量，其定义是

$$J = mR^2 \text{ (千克} \cdot \text{米}^2 \text{ 或 公斤力} \cdot \text{米} \cdot \text{秒}^2 \text{)}$$

式中， m 为质量， R 为回转半径（米）。转动惯量可以通过计算和实验得出。

如果采用重量 G （公斤力）和回转直径 $D=2R$ （米）作单位，则旋转物体的惯性又可用飞轮惯量 GD^2 来量度，它与转动惯量 J 的关系是：

$$GD^2 = 4gJ \text{ (公斤力} \cdot \text{米}^2 \text{)} \quad (1-10)$$

式中， $g=9.81$ 米/秒² 为重力加速度。

飞轮惯量又称飞轮转矩。

6. 功、能和功率

功和能的单位是公斤力·米、焦耳（牛顿·米）、千瓦·小时等。1 公斤力·米是 1 千克（公斤）质量的物体向上举 1 米时所

需要作的功，1 焦耳是用 1 牛顿的力使物体在力的方向上移动 1 米所作的功，1 千瓦·小时是 1 千瓦的功率作功 1 小时所具有的能量。显然

$$1[\text{公斤力} \cdot \text{米}] = 9.8[\text{焦耳}] = \frac{9.8}{3.6 \times 10^6} \text{ 或 } 2.72 \times 10^{-6}[\text{千瓦} \cdot \text{小时}]$$

千瓦·小时在电工计量中又常称作度。

功率的单位是瓦、千瓦以及马力等：

$$\begin{aligned} 1[\text{千瓦}] &= 1000[\text{焦耳/秒}] = 1.36[\text{马力}] \\ &= \frac{1000}{9.8} \text{ 或 } 102[\text{公斤力} \cdot \text{米/秒}] \end{aligned}$$

或者

$$1[\text{马力}] = 75[\text{公斤力} \cdot \text{米/秒}] = 736[\text{瓦}]$$

7. 功率与力·速度，功率与转矩·转速的关系

在直线运动系统中，力为 f （牛顿）、速度为 v （米/秒），则功率

$$P = fv \text{ (瓦)}$$

若力用公斤力（即 9.8 牛顿），速度用米/分（即米/60 秒）作单位，则功率

$$P = \frac{9.8}{60 \times 1000} \cdot fv = \frac{fv}{6120} \text{ (千瓦)}$$

在旋转运动系统中，转矩为 M （牛顿·米），角速度为 Ω （弧度/秒），则功率

$$P = M\Omega \text{ (瓦)} \quad (1-11)$$

若转矩用 M （公斤力·米即 9.8 牛顿·米），速度用 n （转/分即 $2\pi/60$ 弧度/秒），则功率

$$\begin{aligned} P &= 9.81M \times \frac{2\pi}{60} n \times \frac{1}{1000} \\ &= \frac{1}{975} Mn \text{ (千瓦)} \end{aligned} \quad (1-12)$$