

直流电动机及其控制系统

(增量运动控制之一)

王宗培 孔昌平等译

哈尔滨工业大学出版社

直流电动机及其控制系统

(增量运动控制之一)

王宗培 孔昌平等译

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书内容为直流电动机及其控制，它为“增量运动控制系统”两卷本之第一册。

本册共分18章，部份资料选自“美国增量运动控制系统及器件”自1972年至今历届年会论文集，原稿经各作者重写，全书由伊利诺斯州立大学郭宗仪教授（美籍华裔）及犹他州立大学汤一雅可甫教授主编。它是该学术领域中的首批著作。

本书除阐明应用直流电动机的增量运动控制系统的基本原理，数学模型、反馈系统及优化设计外，还讨论了速度、位置、锁相控制系统的特殊设计，专章叙述各类传感器和编码器，介绍直流伺服放大器和脉宽调制放大器。全书以四分之一的篇幅专述微处理机的程序设计，及其在直流电动机控制系统的应用，内容新颖，最后提供了直流电动机增量控制系统的一些实例计算，有助于读者对增量控制理论的深入了解。

本书可供微电机、自动控制、电子技术及计算机等领域内科技工程技术人员参考，并可作大专院校有关专业师生作补充教材之用。

直流电动机及其控制系统

（增量运动控制之一）

王宗培 孔昌平等译

※

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印装

※

开本 787×1092 1/16 印张 17.44 字数 403,000

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印数 1—4,613

书号 15341·8 定价 2.35元

序 言

这两本书是增量运动控制系统和器件领域内的首批著作，上册包括直流电动机及其控制系统。而下册则为步进电动机及其控制系统。

近年来应用直流电动机和步进电动机的增量运动控制系统已经引起了工业界的密切注意、微处理机时代的到来，更进一步扩大了高性能的直流电动机和步进电动机的应用，籍以解决复杂的运动控制系统中的许多问题。

本书中部分资料选自过去历届“增量运动控制系统和器件”年会已发表过的文章，经作者改写后编入，而今年将为这个年会十周年的里程碑。

编著者高兴地得悉直流电动机和步进电动机在中国已有较好的进展，并在它的科学研究与发展中正起着有成效的作用。

在此，编著者谨向王宗培教授和他的同事们表示谢意，感谢他们的努力使这本书得以译成中文出版。

郭宗仪 B.C.Kuo

1981年1月

译 序

今春承美国伊利诺斯州立大学电气工程系郭宗仪 (B.C.Kno) 教授以所编增量运动控制两卷见赠, 阅读一过、爱不释手、深感该书内容新颖, 结合实际、深广有度、不蔓不支, 诚为微电机、自动控制及电子技术及计算机诸专业不可多得的参考读物, 征得编者同意, 由哈工大微电机专业教研室翻译出版, 以期对祖国四化及中美文化交流有所裨益。

本书第一册内容为直流电动机及其控制系统, 第二册为步进电动机及其控制系统。

参加本书译校者: 王宗培、孔昌平、陆永平、顾其善、徐磐熹、李楚武、张宝铭、郭庆吉、郑砥中、张子忠、王凤昌、刘彦彬、李铁才等同志及研究生周长进、刘宝廷、张绍清、李春城诸君、全书由王宗培、孔昌平主译。

原书为集体创作, 译本亦为集体创作, 系统虽一、文笔不同, 加之译者水平有限, 难免有不信不达及错误之处, 恳请原作者及读者批评指正, 无任感激。函寄哈尔滨工业大学微电机教研室。

承郭宗仪教授为中译本撰写序言, 谨表谢忱。

主 译 王宗培 孔昌平

1981.5.1.

前 言

本书为增量运动控制系统及器件两卷本之第一册。本册内容为直流电动机及其控制。预定1979年出版的第二册内容为步进电动机及其控制。

近年、在工业上应用直流电动机和步进电动机的增量运动控制引起众多的注意、由百尔约—香槟城 (Urbana-champaign) 的伊利诺斯州立大学电气工程系 (Department of Electrical Engineering of the University of Illinois) 及瓦纳电气制动和离合器公司 (Warner Electric Brake and Clutch Company) 每年主办的“增量运动控制系统和器件”专题讨论会, 从1972年来吸引世界各地许多工程师和科学家的重视。随着微处理机时代的到来, 更促进了高性能直流电动机和步进电动机在复杂运动控制系统中的应用。

本书主要目的在使现场工程师熟悉如何应用直流电动机作为系统元件来控制运动。这种运动也并非全然是增量的, 并包括某些在工业上, 由于频繁起停运动, 从而要求高性能的最复杂的控制问题在内。本书部份资料来源于历届增量运动控制系统及器件讨论会, 编者相信所选资料是基本而重要的。不少资料经由各作者重写而后编入。微处理机的程序设计在直流电动机控制中的及其应用一章是新的, 并占全书近四分之一的篇幅。

感谢 Jane Carton 校订全部手稿并多方参加编辑工作。

编者向本书投稿诸作者致谢, 作者姓名及工作单位表列于本书下页。

Benjamin C. Kuo

Jacob Tal

1978.5.

作 者

工 作 单 位

D.K.Gehmlich	<i>Department of Electrcal Engineering, The University of Utah</i>
B.C.Kuo	<i>Department of Electrical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign</i>
F.G.Moritz	<i>Mosciatti, Foley, and Moritz, Inc.</i>
E.K.Persson	<i>Electro-Craft Corporatation</i>
S.H.Pollack	<i>Deparment of Electrical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign</i>
C.K.Rushforth	<i>Department of Electrical Engineering, The University of Utah</i>
D.C.Schlick	<i>Burroughs Corporation</i>
R.Schmidt	<i>Data Card Corporation</i>
J.Tal	<i>Department of Electrical Engineering, The Univerty of Utah</i>
H.Waagen	<i>PMIMotors, Division of Kollmorgen Corporation</i>

目 录

前 言

一、绪论 B.C.Kuo.....	1
二、增量运动控制 B.C.Kuo	
2.1 引言	3
2.2 机械系统各元件的数学模型	3
2.3 机械系统的分析	12
2.4 增量运动	15
2.5 增量运动例题	19
三、传感器和编码器 B.C.Kuo	
3.1 引言	20
3.2 电位计	20
3.3 增量编码器	22
3.4 旋转变压器用作增量编码器	31
3.5 磁头用作编码器	34
四、反馈控制系统原理 B.C.Kuo	
4.1 引言	36
4.2 控制系统的数学模型	37
4.3 根轨迹图	41
4.4 频域分析	41
4.5 控制系统设计	47
4.6 采样数据和数字控制系统	50
4.7 结论	53
五、增量运动系统中的直流电动机 E.P. Persson	
5.1 引言	54
5.2 工作原理	54
5.3 直流电动机类别	55
5.4 用于增量运动的直流电动机的选择标准	60
5.5 结论	63
六、直流电动机的数学模型 D.K.Gehmlick	
6.1 引言	64
6.2 机电模型	64
6.3 直流电动机的传递函数	66
6.4 功率损耗	68

5.5	直流电动机的热模型	70
6.6	结论	72
七、高性能增量运动系统中的扭转谐振 J.Tal and H.Waagen		
7.1	引言	73
7.2	扭矩谐振对系统响应的作用	74
7.3	两构件间的扭矩谐振	74
7.4	三构件间的扭矩谐振	77
7.5	扭矩谐振对系统稳定的影响	81
7.6	减小谐振效应的方法	82
7.7	其他考虑事项	84
7.8	总结和讨论	84
八、作速度传感器用的直流测速发电机 J.Tal and E.K.Person		
8.1	引言	86
8.2	直流测速发电机类型	87
8.3	直流测速发电机的数学模型	89
8.4	直流电动机—测速发电机组的数学模型	90
8.5	测速发电机特性	93
8.6	结论	94
九、直流电动机和测速发电机的测试 E.K.Persson and J.Tal		
9.1	引言	95
9.2	直流电动机测试	95
9.3	直流测速发电机测试	99
9.4	结论	101
十、线性直流伺服放大器 R.Schmidt		
10.1	引言	102
10.2	单向伺服放大器	102
10.3	双向伺服放大器	104
10.4	功率放大器的设计原则	107
10.5	功率放大器的交越失真	108
10.6	限流措施	110
10.7	线性放大器中输入与输出的关系	113
10.8	线性两极放大器的设计例题	115
10.9	结论	121
十一、直流伺服系统中的脉宽调制放大器 J.Tal and E.K.Perrson		
11.1	引言	123
11.2	运行方式	123
11.3	双向脉宽调制(PWM)放大器	125
11.4	单向脉宽调制放大器	128

11.5	有限单向脉宽调制放大器	129
11.6	特殊性能	134
11.7	总结	136
十二、速度控制系统 J.Tal		
12.1	导言	137
12.2	系统方框图	137
12.3	系统的设计与分析	139
12.4	速度偏差	143
十三、位置控制系统 J.Tal		
13.2	导言	145
13.2	用测速发电机反馈的位置控制系统	145
13.3	不用测速发电机反馈的位置控制系统	147
十四、锁相伺服系统 J.Tal and C.K.Rushforth		
14.1	导言	149
14.2	系统模型	150
14.3	系统分析	153
14.4	系统设计	155
十五、增量运动伺服系统的最佳设计 J.Tal		
15.1	导言	159
15.2	设计目标	159
15.3	控制选择	161
15.4	部件选择	166
15.5	结论	170
十六、微处理机的程序设计及其在直流电动机控制中的应用 S.H.Pallack		
16.1	导言	137
16.2	程序设计基本概念	173
16.3	计算机结构	174
16.4	机器语言程序设计	182
16.5	汇编语言程序设计	217
16.6	微处理机控制直流电动机	225
附录A 二进制补码算法		242
附录B 16进制和8进制		243
附录C 8080指令系统		244
十七、计算机外围设备中的直流电动机步进系统F.G.Moritz		
17.1	导言	249
17.2	外围设备中增量运动装置举例	249
17.3	设计例题1—双型主动轮系统	252
17.4	设计例题2—行打印机馈纸系统	254

十八、用于移动资料缩微摄影的高性能锁相增量驱动 J.Tal and D.C.Schlick

18.1 引言.....	259
18.2 运动要求和设计方法.....	259
18.3 前进方式.....	260
18.4 返回复位方式.....	261
18.5 复位锁定.....	262
18.6 结论.....	263
单位互换表.....	264

一、绪 论

B.C.Kuo

增量运动控制系统见于多种工业生产过程。近年、由于微电子学及微处理机的进展,电动机控制系统的设计和分析进入了一个新的重要的时代。

一般说、增量运动、顾名思义其所控制运动的特点是从步到步、起停相间的,然增量运动并不仅仅限于起动和停止运行;经常,当起、停速度相当高时,其运动对时间言已是连续的,故本书所包括内容是十分广泛的,即包含以直流电动机为原动机的全部控制系统。

增量运动控制并不是一个新课题,过去它已多应用于一定负荷下需要步进和点位的控制系统,但当时由于缺乏高性能—低电感和低机械惯量—的电动机;缺乏快速电子开关器件;缺乏高精度和高分辨率的编码器,故使传统的增量运动控制系统的速度和总性能的提高受到很大限制。

按历史情况看,用于控制系统的原动机有电动机,液压传动装置、制动离合机组。近年、永磁技术的进展很快,使直流(永磁)电动机成为各种控制系统重要的原动机。随着微处理机的出现,引起了步进电动机新的应用和普及。本书属增量运动第一册,专门讨论直流电动机及其控制系统,由郭宗仪教授(B.C.Kuo)主编的第二册则专门讨论步进电动机及其控制。

按惯例两相异步电动机多用于反馈控制系统、此型电动机先天具有可靠的结构且很少需予维护;至于直流电动机,相对说价格较贵,其中电磁式需用两种电源以供能于激励和电枢,电刷需经常维护,但近年永磁、尤其是稀土永磁技术的进展,使永磁式直流电动机具有高效率,在通常条件下,电刷维护工作亦不过量。

因为直流电动机是一种无择优停位(nopreferential stopping position)的模拟装置,故实际直流电动机控制应用闭环系统,在闭环系统中,输出位置、或速度,或两者均被反馈使之与给定输入量相比较,从而获得所予期的性能。

增量运动控制系统主要用于两大领域:计算机外围系统和数字控制;各种机床工具的控制。

现将应用于计算机工业上主要的增量运动控制系统表列于下:

随机存取盘式存储器

打字机打印滚轮的控制

打字机自动走纸的控制

纸带磁带传送

卡片打孔和读取机

纸带读取和打孔

步进磁带录音机

直流电动机控制系统其他型式的应用有:

印刷工业的自动排版

绕线机

照片复印机

X-Y 微缩摄象机构

纸带图象记录仪

医疗设备

照相及光学设备

纺织机械

银行终端设备

包线机

X-Y 绘图仪

太阳能电极板追踪控制

数字控制的机床工具

包装机械

自动翻译机

飞行器控制系统…等等;

典型的直流电动机控制系统包含的主要部分如图1—1方块图所示。我们将按此图论述全书内容。

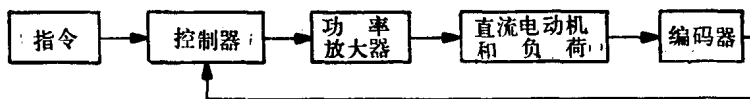


图 1—1 直流电动机控制系统

图 1—1 所示的直流电动机为高性能永磁电动机，它具有低电感和低惯量，此类电动机的工作原理在第 5 章叙述，第 6 章讨论直流电动机的数学模型。

根据直流电动机控制系统的运行特点，图1—1中的编码器可以多种类型，对位置控制可用一简单的电位计；对数字控制则常用光电编码器；对速度控制可用测速发电机，或取来自增量编码器脉冲的速度信息。第 3 章讨论了用于增量运动控制系统的各种编码器；第 8 章讨论测速发电机。

方块图1—1中的功率放大器一般可为直流线性放大器（见第10章）或脉宽调制放大器（见第11章）。线性放大器其电压可连续变化，线路较简，它能用于频宽较广的控制，其缺点是输出晶体管有较大的功率损耗；脉宽调制放大器晶体管工作于开关状态，当三极管导通时，其管压降可以忽略不计；当三极管断路时，其管压降虽高但电流为零，从而减少了输出晶体管的损耗是其优点。

为了较好地分析和设计控制系统，必须具有适当的控制理论知识，第 2 和第 4 两章全面讨论了增量运动及反馈控制原理；第12，13和14章分别讨论速度、位置及锁相控制系统等特殊设计。第15章讨论应用直流电动机增量运动控制系统的优化设计。

在图1—1中的控制器可为各种类型。为便于技术设计，控制器的数学分析常用传递函数描述，控制器的传递函数可由无源电网络或数字网络求得。较复杂的情况下控制器可应用微处理机。第16章是有丰富内容和完美的一章，它首先论述了微处理机程序设计的基础，然后讨论了微处理机在直流电动机控制系统中的应用。最后两章（17和18章）提供了直流电动机增量控制系统的一些实例。

二、增量运动控制

B.C.Kuo

2.1 导 言

本章目的在建立控制系统各环节数学描述的基础，重点放在各机械环节的模型和对增量运动控制系统各种响应的讨论上。

2.2 机械系统各元件的数学模型

因为几乎全部增量运动控制系统的输出都包含有某种类型的机械环节和元件，对这些元件数学的描述是必不可少的。例如由步进电动机或电制动离合机组拖动的多种负荷可视为一种惯性负荷，有时，负荷系指摩擦转矩或摩擦力；负荷与原动机的偶合常常通过传动链条，柔性轴或齿轮系。

通常说，包含机械元件的运动可分为平动、转动和两者兼而有之。概括机械系统各元件的方程皆直接或间接地来源牛顿运动定律。

平移运动 平动定义为沿直线移动的运动，描述平动的变量为加速度、速度、和位移。

按牛顿运动定理作用于刚体已知方向各力的代数和等于物体质量与合力同方向加速度的乘积。此定理可表示为：

$$\Sigma F = M \cdot a \quad (2-1)$$

此处

M —— 质量。

a —— 合力方向的加速度。

对平动而言，通常包含下述部分：

质量 质量是物体储存平动动能性质的指标，它与电网络中的电感相似，若 W 为物体的重量，则

$$M = W/g \quad (2-2)$$

此处 g —— 重力加速度（或自由落体加速度）公式（2-1）和（2-2）中各元素的三种单位制如下：

单位	质量(M)	重量(W)	加速度(a)	力(F)
M·K·S	公斤 = 牛/米/秒 ²	牛	米/秒 ²	牛
CGS	克 = 达因/米/秒 ²	达因	厘米/秒 ²	达因
英制*	斯 = 磅/呎/秒 ²	磅	呎/秒 ²	磅

2-1图示：力作用于质量为 M 的物体，力的方程式写成：

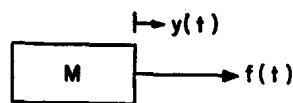


图 2-1 力和质量系统

* 译注—Slug 音译斯勒格，简称斯为呎磅秒制质量的单位 = 32.2磅

$$f(t) = Ma(t) = M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = M \frac{dv(t)}{dt} \quad (2-3)$$

此处 $y(t)$ —— 位移

$v(t)$ —— 速度

$a(t)$ —— 加速度，均以所施力的方向为参考方向

线性弹簧 线性弹簧与实际弹簧相近，弹性钢丝或钢带，一般说弹簧可视为一位能储存的元件，它相似于电网络中的电容。事实上各种弹簧并非全为线性；但若弹簧的形变很小时，则形变与力可近似地视为线性关系；

$$f(t) = K \cdot y(t) \quad (2-4)$$

此处： K —— 弹性常数或简称刚度，它的三种单位制为：

单位 K

MKS 牛/米

CGS 达因/厘米

英制 磅/呎

方程式 (2-4) 的含义为弹簧位移(变形)与作用于弹簧上的力成正比。线性弹簧元件的模型如图2-2所示

如弹簧已予加了一个张力 T ，则方程式 (9-4) 应修改为：

$$f(t) - T = Ky(t) \quad (2-5)$$

平动的摩擦 每当两元件间有运动或运动趋势时则存在摩擦力。在物理系统中碰到的摩擦力常是非线性的。两接触面间摩擦力的性质取决于如表面结构、两面间压力、相对速度及其他一些因素，因此准确地用数学描述摩擦力是困难的。但应用上，摩擦力可基本分为三类：粘滞摩擦。静摩擦和库伦摩擦。现逐一详述如下：

粘滞摩擦 粘滞摩擦是一种正比于速度的阻滞力，摩擦元件的示意图常用图2-3的阻尼器表示之，粘滞摩擦的数学表示为：

$$f(t) = B \cdot \frac{dy(t)}{dt} \quad (2-6)$$

式中 B 为粘滞摩擦系数，在三种单位制中 B 的量纲为：

单位 B

MKS 牛/米/秒

CGS 达因/厘米/秒

英制 磅/呎/秒

图 2-4a 表示粘滞摩擦力与速度的函数关系

静摩擦 静摩擦是运动开始前一瞬间倾向于阻止运动的阻力，它可用下式表示

$$f(t) = \pm (F_s)_{\dot{y}=0} \quad (2-7)$$

式中 $(F_s)_{\dot{y}=0}$ ，表示仅当物体静止但有运动倾向时的静摩擦力。其符号取决于运动的方向或初速度的方向，它与速度的关系如图 2-4b 所示。

注意：一旦运动开始，静摩擦力即消失而代之以其他摩擦力。

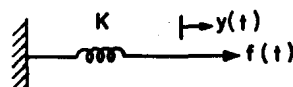


图 2-2 线性弹簧系统

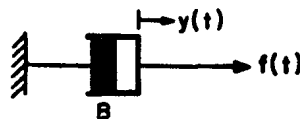


图 2-3 粘滞摩擦力系统

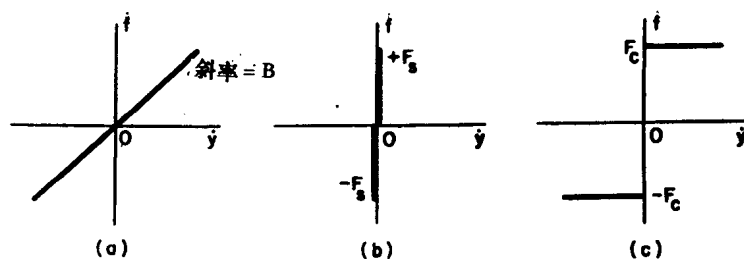


图 2—4

a) 粘滞摩擦; b) 静摩擦; c) 库伦摩擦

库伦摩擦 库伦摩擦是对应速度变化而幅值恒定的阻力，其力的方向随着速度的反向而反向，库伦摩擦的数学式为：

$$f(t) = F_c \left[\frac{dy}{dt} / \left| \frac{dy}{dt} \right| \right] \quad (2-8)$$

式中， F_c 为库伦摩擦系数，此力对速度的关系如图(2—4c)所示。

转动 物体绕固定轴旋转谓之转动，描述转动的变量一般为：转矩 T 、角加速度 α 、角速度 ω 和角位移 θ ，对转动而言常包含下述各因素：

转动惯量 转动惯量 J 是物体储存转动动能性质的指标，一定物体的转动惯量取决于绕转动轴的几何位置及其密度。

例如，一个圆盘或圆轴其绕几何轴线的转动惯量为：

$$J = 1/2 \cdot M \cdot r^2 \quad (2-9)$$

此处 M ——圆盘或转轴的质量。

r ——圆盘或转轴的半径。

例题2—1 已知直径1吋，厚0.25吋，重0.5两的圆盘求转动惯量：

$$J = \frac{1}{2} \frac{W r^2}{g} = \frac{1}{2} \frac{(5\text{两})(1\text{吋})^2}{386\text{吋/秒}^2} \\ = 0.00647\text{两—吋—秒}^2$$

金属的密度常用单位体积的重量表示，对圆盘或转轴可知转动惯量正比于半径的四次方，而仅正比于厚度或长度一次方，故若重量表示为：

$$W = \rho(\pi r^2 h) \quad (2-11)$$

此处 ρ ——单位体积的重量，

r ——半径

h ——圆盘厚度或转轴长度。

方程式(2—9)可写成：

$$J = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi h r^4}{g} = 0.0040 \rho h r^4 \quad (2-12)$$

此处 h 和 r 均以吋为单位

对钢言： $\rho = 4.53\text{两/吋}^3$ ，则式(2—12)为：

$$J = 0.0184 h r^4 \quad (2-13)$$

对铝言: $\rho = 1.56$ 磅/吋³, 则式 (2-12) 为:

$$J = 0.00636hr^4 \quad (2-14)$$

当转矩作用于一转动惯量为 J 的物体如图 (2-5) 所示, 则转矩方程式写为:

$$T(t) = J \cdot \alpha(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (2-15)$$

式 (2-15) 中各量通用的三种单位制见下表:

单位	转动惯量	转矩	角位移
MKS	公斤—米—秒 ²	牛—米	弧度 (径)
CGS	克—厘米—秒 ²	达因—厘米	弧度
英制	斯—呎 ²	磅—呎	弧度
	或磅—呎—秒 ²		
	呎—吋—秒 ²	呎—吋	

常用的换算因子如下列:

角位移:

$$1 \text{ 弧度} = 180/\pi = 57.3 \text{ 度}$$

角速度:

$$1 \text{ 转/分} = 2\pi/60 = 0.1047 \text{ 弧度/秒}$$

$$1 \text{ 转/分} = 60/\text{秒}$$

转矩:

$$1 \text{ 克—厘米} = 0.0139 \text{ 呎—吋}$$

$$1 \text{ 磅—呎} = 192 \text{ 呎—吋}$$

$$1 \text{ 呎—吋} = 0.00521 \text{ 磅—呎}$$

转动惯量:

$$1 \text{ 克—厘米}^2 = 1.417 \times 10^{-5} \text{ 呎—吋—秒}^2$$

$$1 \text{ 磅—呎—秒}^2 = 192 \text{ 呎—吋—秒}^2$$

$$1 \text{ 呎—吋—呎}^2 = 386 \text{ 呎—吋}^2$$

$$1 \text{ 克—厘米—秒}^2 = 980 \text{ 克—厘米}^2$$

$$1 \text{ 磅—呎—秒}^2 = 32.2 \text{ 呎—吋}^2$$

扭矩弹簧 与平动中线性弹簧相类似, 扭矩弹性常数为在转矩作用下杆或轴发生可塑性变形每单位角位移对应的转矩, 图 (2-6) 表示一简单转矩—弹簧系统, 它的方程式为:

$$T(t) = K \cdot \theta(t) \quad (2-16)$$

K 的量纲在三种单位制中为:

单位	K
MKS	牛—米/弧度
CGS	达因—厘米/弧度
英制	呎—吋/弧度

若扭矩弹簧预先受到转矩 T_P 的作用, 则式 (2-16) 应改为:

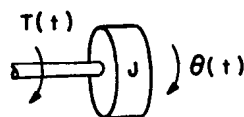


图 2-5 转矩—转动惯量系统

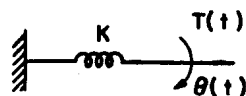


图 2-6 扭矩弹簧系统