

高等学校教材

机电传动控制

► 周宏甫 编



化学工业出版社

高等学校教材

机电传动控制

周宏甫 编



化学工业出版社

·北京·

本书介绍了直流电动机、交流电动机和步进电机的构造、工作原理,介绍了电机的控制方法和可编程控制器编程与应用。

本书内容全面,突出机电结合;以基础理论为重点,注重实际应用。全书共分13章。第1章为绪论;第2章介绍机电传动系统的运动方程式,为电机控制系统建立动力学模型;第3章介绍直流电动机工作原理及运行特性;第4章介绍变压器;第5章介绍交流电动机工作原理及运行特性;第6章介绍机电传动系统的过渡过程;第7章介绍控制电机,包括伺服电动机、力矩电动机、自整角机、旋转变压器、测速发电机、同步电机和直线电机;第8章介绍电动机的选择;第9章介绍晶闸管及其基本电路;第10章介绍继电器-接触器控制系统;第11章介绍可编程控制器 PLC;第12章介绍机电传动控制系统,包括直流传动控制系统、交流传动控制系统与开环控制系统;第13章介绍步进电机。本书各章后面附有思考题或习题,供复习与练习用。

本书适用于机械电子工程及相关专业,也可作其他有关专业学生、高级工程技术和维修人员的参考用书。

清华大学出版社

机械工业出版社

239918

图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/周宏甫编. —北京:化学工业出版社,
2006.5
高等学校教材
ISBN 978-7-5025-8709-3

I. 机… II. 周… III. 电力传动控制设备-高等学
校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第051817号

责任编辑:程树珍
责任校对:顾淑云

文字编辑:焦红
装帧设计:潘峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张14 字数365千字 2011年1月北京第1版第4次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

前 言

《机电传动控制》是根据机电工程和自动化专业教学计划所提出的教学基本要求编写的。

本书对交、直流传动系统和步进电机控制系统中的启动、制动、调速与过渡过程作了较详细的阐述。直流传动系统主要介绍直流电动机及控制系统的工作原理，静、动态性能和直流传动系统的设计方法。交流传动系统主要介绍异步电动机工作原理、速度控制和主要控制环节，并介绍无刷直流电动机的工作原理和数学模型。控制电机主要介绍伺服电动机、力矩电动机、旋转变压器、测速发电机、同步电动机和直线电机的工作原理及控制方法。可编程控制器主要介绍可编程控制器的工作原理与编程。晶闸管及其基本电路主要介绍电机控制系统应用中的常用的元器件和基本电路。

本书加强了机电传动控制自动控制系统方面的内容，力图反映机电传动控制领域技术发展的现状。

由于编者水平有限，书中如有错误和不妥之处，希望广大读者批评指正。

华南理工大学 周宏甫
2006年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 教材内容与课程性质	1
1.2 机电传动系统及其发展概况	2
习题与思考题	2
第 2 章 机电传动系统的动力学	3
2.1 机电传动系统的转动方程式	3
2.2 负载转矩计算	4
2.3 负载惯量计算	6
2.4 功率计算	7
2.5 电动机的稳定性分析及稳定运行条件	8
习题与思考题	9
第 3 章 直流电机	11
3.1 直流电动机的结构与分类	11
3.2 直流电机原理	13
3.3 直流电动机的启动与调速	15
3.4 直流电动机的机械特性分析	19
3.5 直流电动机的制动	21
习题与思考题	28
第 4 章 变压器	29
4.1 变压器的用途与结构	29
4.2 变压器的工作原理	31
4.3 变压器的外特性	34
4.4 三相变压器	34
4.5 特殊变压器	35
4.6 变压器绕组极性的测定	37
习题与思考题	38
第 5 章 交流电机	39
5.1 三相异步电动机的结构	39
5.2 三相异步电动机的工作原理	40
5.3 交流电机的调速	46
5.4 三相异步电动机的机械特性	51
5.5 三相异步电动机的制动	57
5.6 三相异步电动机的启动	59
5.7 单相异步电动机	64

习题与思考题	68
第 6 章 机电传动系统的过渡过程	71
6.1 过渡过程的概念	71
6.2 机电传动系统过渡过程的分析	72
6.3 指数信号输入他励直流电动机的机电过渡过程	73
6.4 机电时间常数	75
6.5 加快机电传动系统过渡过程的方法	76
习题与思考题	77
第 7 章 控制电机	78
7.1 伺服电动机	78
7.2 力矩电动机	82
7.3 自整角机	84
7.4 旋转变压器	87
7.5 测速发电机	87
7.6 同步电机	90
7.7 直线电机	96
习题与思考题	104
第 8 章 电动机的选择	105
8.1 电动机容量选择	105
8.2 电动机类型、转速和电压的选择	110
习题与思考题	113
第 9 章 晶闸管及其基本电路	114
9.1 功率开关器件	114
9.2 可控硅整流电路	123
9.3 晶闸管触发器	127
9.4 逆变器	131
9.5 晶闸管保护电路	134
习题与思考题	135
第 10 章 继电器-接触器控制系统	137
10.1 常用的电器元器件	137
10.2 继电器-接触器控制线路	150
习题与思考题	167
第 11 章 可编程控制器	169
11.1 可编程控制器概述	169
11.2 可编程控制器的组成与工作原理	170
11.3 基本指令系统和编程方法	176
习题与思考题	181
第 12 章 机电传动控制系统	182
12.1 机电传动控制系统的组成与分类	182
12.2 直流传动控制系统	183

12.3	电磁转差离合器的调速原理.....	186
12.4	无换向器电机调速系统.....	187
12.5	异步电机矢量控制原理.....	200
	习题与思考题.....	201
第 13 章	步进电机	203
13.1	概述.....	203
13.2	反应式步进电机工作原理.....	203
13.3	步进电机的静动态指标术语.....	206
13.4	步进电机控制软件设计.....	207
13.5	步进电机控制方式.....	208
13.6	驱动控制系统组成.....	209
13.7	步进电机和交流伺服电机性能比较.....	212
13.8	步进电机的选择与应用.....	213
13.9	步进电机发热问题及处理.....	214
	习题与思考题.....	215
参考文献	216

第 1 章 绪 论

1.1 教材内容与课程性质

1.1.1 课程性质

机电传动控制是机电一体化、工业自动化专业必修的专业基础课。它既是研究电机拖动与电机传动控制系统基础理论的学科，又可以作为一门独立的技术应用课。本课程的理论性与实践性都很强，通过本课程学习，使学生掌握各种电机的基本结构与工作原理，独立分析电机拖动系统各种运行状态，掌握有关计算方法，合理地选择和使用电动机，为从事电机拖动与电机传动控制专业技术工作做好基本培养和锻炼。

1.1.2 课程内容

本课程内容包括机电设备传动系统的动力学基础、电机拖动、传动系统的过渡过程分析、有触点控制系统、可编程控制器、步进电动机控制和直流、交流传动控制系统等。课程内容突出机电结合，电为机用，理论联系实际，原理与应用并重。要求掌握电动机和各种控制元器件的工作原理、特性、应用和选用方法，强调其在控制系统中的应用，掌握常用的控制方法和开、闭环控制系统的工作原理、性能及应用。系统分析采用定性与定量相结合，重在定性，并建立必要的数量概念。

1.1.3 教学基本要求

机电传动控制作为原动机拖动机械做功的主要部分，它主要是由电动机、传动机构、工作机械和 PLC 等装置组成的机电系统。教学要培养学生以下能力：

- i. 电动机负载转矩折算的计算；
- ii. 直流电动机负载运行计算、调速性能计算、启制动电阻计算和过渡过程计算；
- iii. 三相异步电动机机械特性计算；
- iv. 三相异步电动机降压启动的计算与选择，三相绕线式异步电动机转子回路串电阻分级启动计算；
- v. 各种电动机、变压器额定数据的计算，变压器负载运行计算，电压调整率计算；
- vi. 选择电力拖动系统电动机的形式、种类、电压、转速及额定功率，校核发热，启动能力与过载能力；
- vii. 初步掌握直流电动机、交流电动机、步进电动机的控制系统设计；
- viii. 掌握 PLC 控制系统设计的设计方法。

1.1.4 实验与习题

(1) 实验

实验是本课程重要的教学环节，培养学生把理论用于实际、解决实际问题的能力。通过实验，学生应做到：

- i. 熟练交直流电动机和步进电动机的各种接线与操作；
- ii. 熟练掌握使用 PLC 进行工业自动控制的方法，正确使用 PLC 及常用的仪表。

(2) 习题（包括思考题）

习题（包括思考题）也是本课程的重要教学内容，学生通过习题与思考题的训练，不仅可以巩固基本理论，还可以掌握基本工程计算方法，提高分析与解决工程实际问题的能力。

本课程每节授课学时都要有习题和思考题，一般不低于2题，题目结合工程实际，富有启发性。

1.1.5 课程的深度和广度

- i. 对于基本原理，着重物理概念的阐述，只有必需的数学推导，减少数学推导过程。
- ii. 精选教学内容，有重点，不要面面俱到。例如直流电动机只突出他励直流电动机，其他励磁方式内容减少到最低限度。
- iii. 电动机的结构、绕组尽量简单，电动机的磁场、电磁关系及参数等尽量简明、准确、深入浅出，以能理解、引出和掌握后续部分主要内容为度，即做到“必需”和“够用”。
- iv. 交、直流电动机的启动、制动、调速及四象限运行是本课程重点内容，要注意理论联系实际，突出实用性。
- v. 微控电动机着重于外特性，突出实用。
- vi. 教学内容的安排与阐述力求由浅入深，深入浅出，条理清楚，通俗易懂。

1.2 机电传动系统及其发展概况

机电传动及其控制系统是随着社会生产的发展而发展的，电动机作为机电传动的重要内容，其发展经历了成组的拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动，就是一台电动机拖动一根天轴，然后由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械，这种拖动方式生产效率低，劳动条件差，一旦电动机发生故障，将造成成组的生产机械停车。所谓单电机拖动，就是用一台电动机拖动一台生产机械，它虽较成组拖动前进了一步，但当一台生产机械的运动部件较多时，机械传动机构仍十分复杂。多电机拖动，即一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动，例如铣床的X、Y、Z进给轴和主轴转动均分别由一台电动机单独拖动，这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构，而且控制灵活，为生产机械的自动化提供了有利的条件，所以现代化机电传动基本上均采用这种传动方式。

控制系统的发展伴随控制器件的发展而发展。随着功率器件、放大器件的不断更新，机电传动控制系统的发展日新月异，它主要经历了四个阶段：最早的机电传动控制系统出现在20世纪初，它仅借助于简单的接触器与继电器等控制电器，实现对控制对象的启动、停车以及有级调整等控制，它的控制速度慢，控制精度差；20世纪30年代出现了电机放大机控制，它使控制系统从控制发展到连续控制，连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态，并根据输出量与给定量的控制对象进行自动调整；20世纪40年代至50年代出现了磁放大器控制和大功率可控水银整流器控制；20世纪50年代末期出现了大功率固体可控整流元件——晶闸管，后又出现了功率晶体管控制，由于晶体管、晶闸管，具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、质量小等优点，它们的出现为机电传动自动控制系统开辟了新纪元。

习题与思考题

- 1.1 试述机电传动控制系统的概念。
- 1.2 试述机电传动控制的发展过程。

第 2 章 机电传动系统的动力学

机电传动系统是以电动机为主要部件，通过传动机构带动生产机械运转的一个运动学整体。虽然电动机可以是不同种类和特性，生产机械的负载特性也是各种各样的，但从动力学角度分析，它们都服从动力学的统一规律。

2.1 机电传动系统的转动方程式

一般情况下，机电传动系统可分为电动机、工作机构、控制设备及电源四个组成部分，在许多情况下，电动机与工作机构之间有传动机构。图 2-1 所示为机电传动系统组成。

(1) 直线运动时的运动方程式

图 2-2 是直线运动示意图，其直线运动的方程式如下。

$$F - F_Z = m \frac{dv}{dt} \quad (2-1)$$

式中 F ——拖动力，N；

F_Z ——阻力，N；

$m \frac{dv}{dt}$ ——惯性力，N。



图 2-1 机电传动系统组成

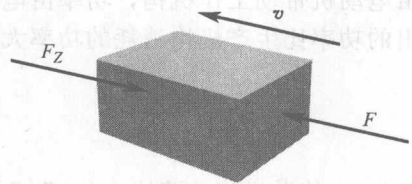


图 2-2 直线运动示意图

(2) 旋转运动时的方程式

图 2-3 是旋转运动示意图，其旋转运动的方程式如下。

$$T - T_Z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-2)$$

式中 T ——电动机产生的拖动转矩， $N \cdot m$ ；

T_Z ——阻转矩（或称负载转矩）， $N \cdot m$ ；

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——惯性转矩（或称加速转矩）， $N \cdot m$ 。

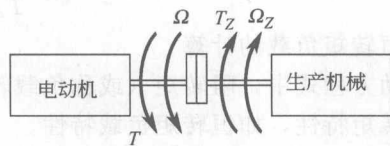
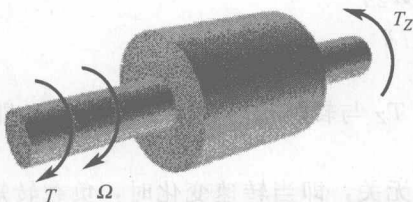


图 2-3 旋转运动示意图

转动惯量 J 的表达式为

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (2-3)$$

式中 J ——转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

m ——旋转部分的质量, kg ;

G ——旋转部分的重量, N ;

ρ, D ——惯性半径与直径, m ;

g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{m/s}^2$;

GD^2 ——飞轮转矩, $\text{N} \cdot \text{m}^2$;

Ω ——转动速度, rad/s 。

实际计算中常将旋转运动方程式化为另一种形式, 即将角速度 Ω 化成用每分钟转数 n (r/min) 表示的形式。

2.2 负载转矩计算

2.2.1 负载转矩特性

(1) 电动机的工作状态

i. 稳定运转状态, 当 $T = T_Z$, $dn/dt = 0$, $n = \text{常值}$, 电动机静止或等速旋转。

ii. 加速状态, 当 $T > T_Z$, $dn/dt > 0$ 。

iii. 减速状态, 当 $T < T_Z$, $dn/dt < 0$ 。

(2) 电动机工作在电动状态时的负载转矩

由电动机带动工作机构, 功率由电动机向工作机构传送, 传动损耗由电动机承担, 电动机发出的功率比生产机构消耗的功率大。

$$\begin{aligned} T\Omega &= \frac{T_Z\Omega_Z}{\eta} \\ T_Z &= Tj\eta \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中 j ——传动机构的速比, $j = \Omega/\Omega_Z$;

η ——传动机构总效率, 在使用多级传动时, 如各级效率为 $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots$, 则 η 应为各级效率的乘积: $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$ 。

常见机构的传动效率:

i. 每对齿轮 (用滚动轴承) 的满载效率为 $0.975 \sim 0.985$;

ii. 蜗轮蜗杆传动的满载效率为 $0.5 \sim 0.7$, 可由机械工程手册查到。

(3) 电动机工作在发电制动状态时的负载转矩

由工作机构带动电动机, 功率传送方向与电动状态时相反, 传动损耗功率由工作机构承担, 传送到电动机轴上的功率较工作机构轴上的功率小。

$$\begin{aligned} T\Omega &= T_Z\Omega_Z\eta \\ T_Z &= Tj/\eta \end{aligned} \quad (2-5)$$

(4) 恒转矩负载的计算

在运动方程式中, 阻转矩 (或称负载转矩) T_Z 与转速 n 的关系 $T_Z = f(n)$ 即为生产机械的负载转矩特性, 如恒转矩负载特性。

恒转矩负载的特点是负载转矩 T_Z 与转速 n 无关, 即当转速变化时, 负载转矩 T_Z 保持常值。恒转矩负载又可分为反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载。

①反抗性负载 反抗性恒转矩负载特性的特点是，恒转矩 T_Z 总是反对运动方向，如金属的压延、机床的平移机构和图 2-4 所示的摩擦负载转矩等。

②位能性负载 位能性恒转矩负载是指在匀速启动等负载下的转矩负载，如图 2-5 所示。其特点是：转矩 T_Z 具有固定的方向；不随转速方向改变而改变。例如，起重类型负载中的重物。

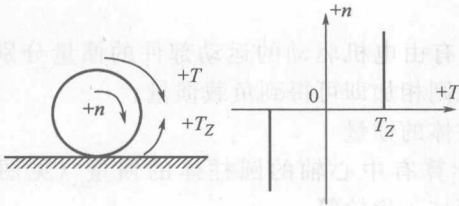


图 2-4 摩擦负载转矩

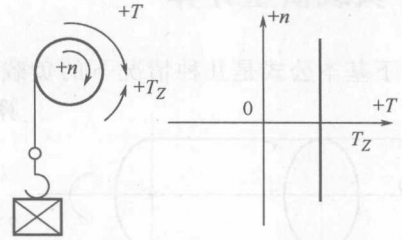


图 2-5 位能性负载转矩

2.2.2 负载转矩计算

图 2-6 是机床拖板由电机通过螺杆驱动的示意图， F 是负载力。

按等功原理

$$2\pi T_L = \frac{Fl}{\eta}$$

即施加于电机轴上的负载转矩为

$$T_L = \frac{Fl}{2\pi\eta} + T_c \quad (2-6)$$

式中 T_L ——电机轴上的负载转矩， $N \cdot m$ ；

F ——使滑台（工作台或刀架）以轴向运动的力， N ， F 取决于工作台重量，摩擦系数，水平或垂直方向的切削推力，垂直轴场合是否配重平衡等因素；

η ——传动系统的效率；

l ——电机轴每转机械移动量；

T_c ——轴承、滚珠丝杠副等部件折算到电机轴上的摩擦转矩。

式 (2-7) 是 F 力的计算公式。

非切削时间 $F = \mu(W + f_g)$

切削时间 $F = F_c + \mu(W + f_g + F_c f) \quad (2-7)$

式中 W ——滑台重力（工作台及工件）， N ；

μ ——摩擦系数；

f_g ——夹紧力， N ；

F_c ——由切削力产生的反向推力， N ；

$F_c f$ ——工作台相对导轨表面由切削运动而产生的力， N 。

常用的计算折合到电机轴上的负载转矩的方法如下：

$$T_L = \frac{9.8 \times \mu W P_B}{2\pi R \eta} \quad (N \cdot m) \text{ (水平直线运动轴)}$$

式中 P_B ——滚珠丝杠螺距， m ；

$1/R$ ——减速比。

$$T_L = \frac{9.8 \times (W - W_c) P_B}{2\pi R \eta} \quad (N \cdot m) \text{ (垂直直线运动轴)}$$

式中 W_c ——配重块重力, N。

$$T_L = \frac{T_l}{R\eta} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (\text{旋转轴运动})$$

式中 T_l ——负载转矩, N·m。

2.3 负载惯量计算

以下基本公式是几种情况下的负载惯量。对所有由电机驱动的运动部件的惯量分别计算, 并按照规则相加即可得到负载惯量。

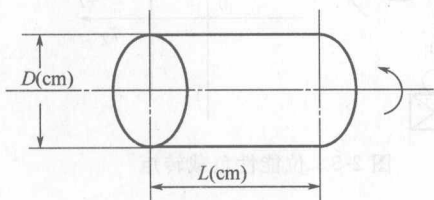


图 2-7 圆柱体的惯量

(1) 圆柱体的惯量

由下式计算有中心轴的圆柱体的惯量 (见图 2-7), 如滚珠丝杠、齿轮等。

$$J_K = \frac{\pi\gamma}{32 \times 980} D^4 L \quad (\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2)$$

$$\text{或} \quad J_K = \frac{\pi\gamma}{32} L D^4 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2-8)$$

式中 γ ——密度, kg/cm^3 ; 铁为 $7.87 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{cm}^3 = 7.87 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, 铝为 $2.70 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{cm}^3 = 2.70 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$;

J_K ——惯量, $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

D ——圆柱体直径, cm 或 m;

L ——圆柱体长度, cm 或 m。

(2) 直线运动体的惯量

用下式计算诸如工作台、工件等部件的惯量。

$$J_{L1} = \frac{W}{980} \left(\frac{P_B}{2\pi} \right)^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2)$$

$$= W \left(\frac{P_B}{2\pi} \right)^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2-9)$$

式中 W ——直线运动体的质量, kg;

P_B ——以直线方向电机每转移动量, cm 或 m。

(3) 有变速机构时折算到电机轴上的惯量 (见图 2-8)

$$J_{L1} = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \times J_0 \quad (\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2-10)$$

式中 Z_2, Z_1 ——齿轮齿数。

(4) 具有图 2-9 中所示旋转中心的圆柱体的惯量

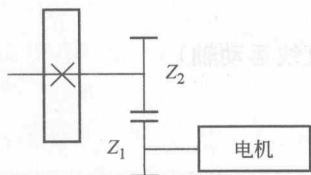


图 2-8 有减速装置时折算到电机轴上的惯量

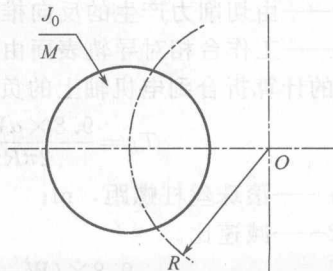


图 2-9 旋转体的惯量

$$J = J_0 + \frac{M}{980} R^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2) \quad (2-11)$$

式中 J_0 ——圆柱体中心周围的惯量, $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$;

M ——圆柱体质量, kg ;

R ——旋转半径, cm 。

(5) 空心圆柱体的惯量 (见图 2-10)

$$J = \frac{\pi \gamma}{32 \times 980} L (D_0^4 - D_1^4) \quad (2-12)$$

式中 γ ——密度, kg/cm^3 ;

L ——柱体长度, cm ;

D_0 ——柱体外径, cm ;

D_1 ——柱体内径, cm 。

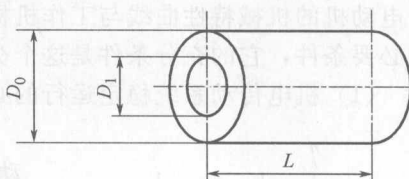


图 2-10 空心圆柱体的惯量
(单位: cm)

(6) 对于垂直轴直线运动, 当有配重时, 务必考虑配重体的惯量

$$J_{L1} = (W + W_C) \left(\frac{P_B}{2\pi R} \right)^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2-13)$$

式中 W_C ——配重体质量, kg ;

$1/R$ ——减速比;

P_B ——滚珠丝杠螺距, m 。

不同形状物体的转动惯量如表 2-1 所示。

表 2-1 不同形状物体的转动惯量

物体形状	转动惯量	物体形状	转动惯量
质点	mR^2	圆环	$m(R^2 + 3r^2/4)$
圆柱	$mR^2/2$	圆球	$2mR^2/5$
圆锥	$3mR^2/10$		

2.4 功率计算

在电机选用中, 除惯量、转矩之外, 另一个注意事项即是电机功率计算。一般可按式求得。

(1) 运转功率计算

$$P_0 = \frac{2\pi N_M T_L}{60} \quad (2-14)$$

式中 P_0 ——运转功率, W ;

N_M ——电机运行速度, r/min ;

T_L ——负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

(2) 加速功率计算

$$P_a = \left(\frac{2\pi N_M}{60} \right)^2 \frac{J_L}{t_a} \quad (2-15)$$

式中 P_a ——加速功率, W ;

N_M ——电机运行速度, r/min ;

J_L ——负载惯性, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

t_a ——加速时间常数, s 。

2.5 电动机的稳定性分析及稳定运行条件

机电传动系统的稳定运行有两种含义：第一是应能以一定的速度匀速运转；第二就是系统受到某种外部干扰使转速有变化时，应保证干扰消除后仍能以原来的转速运行。要做到第一点，就必须是使电动机的电磁转矩与负载转矩大小相等，方向相反，相互平衡。这就意味着电动机的机械特性曲线与工作机械特性曲线有一个交点。但是，有交点只是保证系统稳定的必要条件，它的充分条件是这个交点必须是稳定的平衡点。

(1) 机电传动系统稳定运行的必要充分条件的判断法

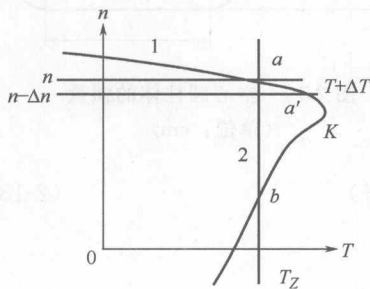


图 2-11 交流异步电动机机械特性

在图 2-11 交流异步电动机机械特性图中，曲线 1 是电动机的机械特性曲线，曲线 2 是工作机械的特性曲线，两者相交于 a 、 b 点。

a 点：当系统出现干扰时，例如负载转矩增大 ΔT_Z ，根据电动机机械运动方程可知系统要减速 Δn ，从电动机机械特性曲线上看， $n - \Delta n$ 对应的电磁转矩为 $T + \Delta T$ ，平衡后的负载转矩 $T_Z + \Delta T_Z$ ，因此形成了新的平衡点 a' ，所以 a 点是稳定的平衡点。

b 点：同样当负载转矩增加 ΔT_Z 时，系统要减速 Δn ，但是 b 点所在的电动机机械特性曲线线段上， $n - \Delta n$ 对应的电磁转矩为 $T - \Delta T$ ，使电磁转矩减小了，结果使转速进一步降低，直到停止转动为止；相反，如果负载转矩减小，根据运动方程，则转速要增加，增加的转速使对应的电磁转矩也增加，这一正反馈使转速进一步增加。所以 b 点不是稳定平衡点。

从上面的分析可以总结出机电传动系统稳定运行的必要充分条件如下。

i. 电动机与工作机械的机械特性曲线要有一个交点。

ii. 在这个交点对应的转速之上，必须要保证 $T < T_Z$ ；而在这个交点对应的转速之下，必须要保证 $T > T_Z$ 。

只有满足稳定运行的条件下，电动机和工作机械才能可靠安全运行。

图 2-12 是用该方法进行稳定平衡点判断的一个例子。

在图 2-12 中，电动机的转速-转矩特性与负载转速-转矩特性的交点是电动机的运行点，但不一定是稳定运行点。在图 2-12 (a) 所示的转速-转矩特性中，电动机于交点 c 处运行时，由于某种原因使转速增大，负载转矩 M_L 大于电动机转矩 M_r ，因此，转速降低返回到 c 点。这样 c 点即为稳定运行点。而在图 2-12 (b) 所示特性中，由于某种原因使转速增大，电动机转矩 M_r 从大于负载转矩 M_L 时，转速继续增大，不能返回到 c 点，这样 c 点就是不稳定运行点。

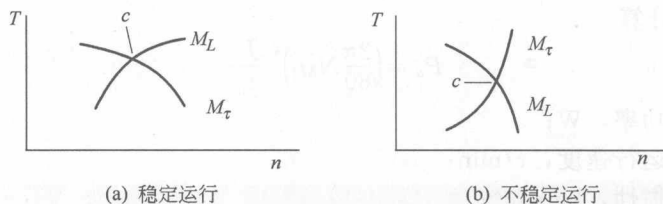
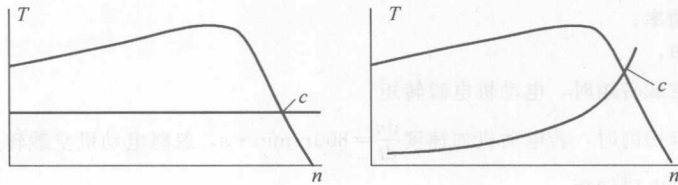


图 2-12 转速-转矩特性

稳定平衡点判断与负载的转速-转矩特性有关，常用的负载的转速-转矩特性有恒定转矩特性与递减转矩特性两种。所谓恒定转矩特性就是电动机的转速变化，而转矩不变。例如，提升机、举重机负载的转速-转矩特性，特性如图 2-13 (a) 所示。



(a) 稳定点c

(b) 不稳定点c

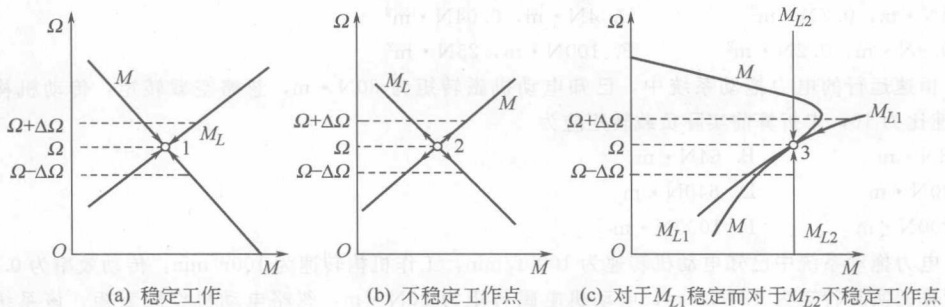
图 2-13 负载的转速-转矩特性

递减转矩特性是指转矩随着转速下降而减小的负载，例如鼓风机、抽水泵等，这时转矩与转速的平方成正比，如图 2-13 (b) 所示。

(2) 机电传动系统稳定运行的必要充分条件的扰动判断法
由机械运动方程式

$$M - M_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

可知，在以一定速度下运行时电动机产生的驱动转矩等于静态负载转矩。图 2-14 (a)、(b) 示出两种情况，其中点 1 为稳定的平衡工作点，在给以速度扰动 $+\Delta\Omega$ 后， $M_L > M$ ，电机减速，趋向点 1；而给以速度扰动 $-\Delta\Omega$ 后， $M > M_L$ ，电机加速，也趋向点 1。相反，点 2 是不稳定的平衡点，稍有扰动，电机就加速或减速偏离该点。



(a) 稳定工作

(b) 不稳定工作点

(c) 对于 M_{L1} 稳定而对于 M_{L2} 不稳定工作点

图 2-14 电动机特性与工作机特性的配合

图 2-14 (c) 示出的电动机特性，点 3 对于通风机类型负载 M_{L1} 是稳定的平衡点，而对于恒转矩负载 M_{L2} 却是不稳定的平衡点。为使系统稳定运行在现有机械特性的不稳定平衡点上必须采用反馈手段改造机械特性，使之变成稳定的。

习题与思考题

- 2.1 说明机电传动系统运动方程式中的拖动转矩、静态转矩和动态转矩的概念。
- 2.2 多轴拖动系统为什么要折算成单轴拖动系统？转矩折算为什么依据折算前后功率不变的原则？转动惯量折算为什么依据折算前后动能不变的原则？
- 2.3 为什么低速轴转矩大？高速轴转矩小？
- 2.4 在图 2-15 中，曲线 1 为电动机的机械特性，曲线 2 与曲线 3 为负载的机械特性，试判断哪些点是系统的稳定平衡点？哪些不是？

2.5 图 2-16 所示的某车床电力拖动系统中, 已知切削力 $F=2000\text{N}$, 工件直径 $d=150\text{mm}$, 电动机转速 $n=1450\text{r/min}$, 减速箱的三级速比 $j_1=2, j_2=1.5, j_3=2$, 各转轴的飞轮矩为 $GD_a^2=3.5\text{N}\cdot\text{m}^2$ (指电动机轴), $GD_b^2=2\text{N}\cdot\text{m}^2, GD_c^2=2.7\text{N}\cdot\text{m}^2, GD_d^2=9\text{N}\cdot\text{m}^2$, 各级传动效率分别都是 $\eta=0.9$, 求

- (1) 切削功率;
- (2) 电动机输出功率;
- (3) 系统总飞轮矩;
- (4) 忽略电动机空载转矩时, 电动机电磁转矩;

(5) 车床开车但未切削时, 若电动机加速度 $\frac{dn}{dt}=800\text{r/min}\cdot\text{s}$, 忽略电动机空载转矩但不忽略传动机构的转矩损耗, 求电动机电磁转矩。

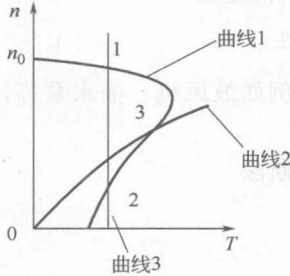


图 2-15 题 2.4 附图

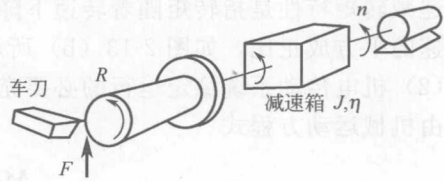


图 2-16 题 2.5 附图

2.6 选择以下各题的正确答案

(1) 电动机经过速比 $j=5$ 的减速器拖动工作机构, 工作机构的实际转矩为 $20\text{N}\cdot\text{m}$, 飞轮矩为 $1\text{N}\cdot\text{m}^2$, 不计传动机构损耗, 折算到电动机轴上的工作机构转矩与飞轮矩分别依次为

- | | |
|---|--|
| A. $20\text{N}\cdot\text{m}, 5\text{N}\cdot\text{m}^2$ | B. $4\text{N}\cdot\text{m}, 1\text{N}\cdot\text{m}^2$ |
| C. $4\text{N}\cdot\text{m}, 0.2\text{N}\cdot\text{m}^2$ | D. $4\text{N}\cdot\text{m}, 0.04\text{N}\cdot\text{m}^2$ |
| E. $0.8\text{N}\cdot\text{m}, 0.2\text{N}\cdot\text{m}^2$ | F. $100\text{N}\cdot\text{m}, 25\text{N}\cdot\text{m}^2$ |

(2) 恒速运行的电力拖动系统中, 已知电动机磁转矩为 $80\text{N}\cdot\text{m}$, 忽略空载转矩, 传动机构效率为 0.8 , 转速比为 10 , 未折算前实际负载转矩应为

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| A. $8\text{N}\cdot\text{m}$ | B. $64\text{N}\cdot\text{m}$ |
| C. $80\text{N}\cdot\text{m}$ | D. $640\text{N}\cdot\text{m}$ |
| E. $800\text{N}\cdot\text{m}$ | F. $1000\text{N}\cdot\text{m}$ |

(3) 电力拖动系统中已知电动机转速为 1000r/min , 工作机构转速为 100r/min , 传动效率为 0.9 , 工作机构未折算的实际转矩为 $120\text{N}\cdot\text{m}$, 电动机电磁转矩为 $20\text{N}\cdot\text{m}$, 忽略电动机空载转矩, 该系统肯定运行于

- | | | |
|---------|-------|---------|
| A. 加速过程 | B. 恒速 | C. 减速过程 |
|---------|-------|---------|