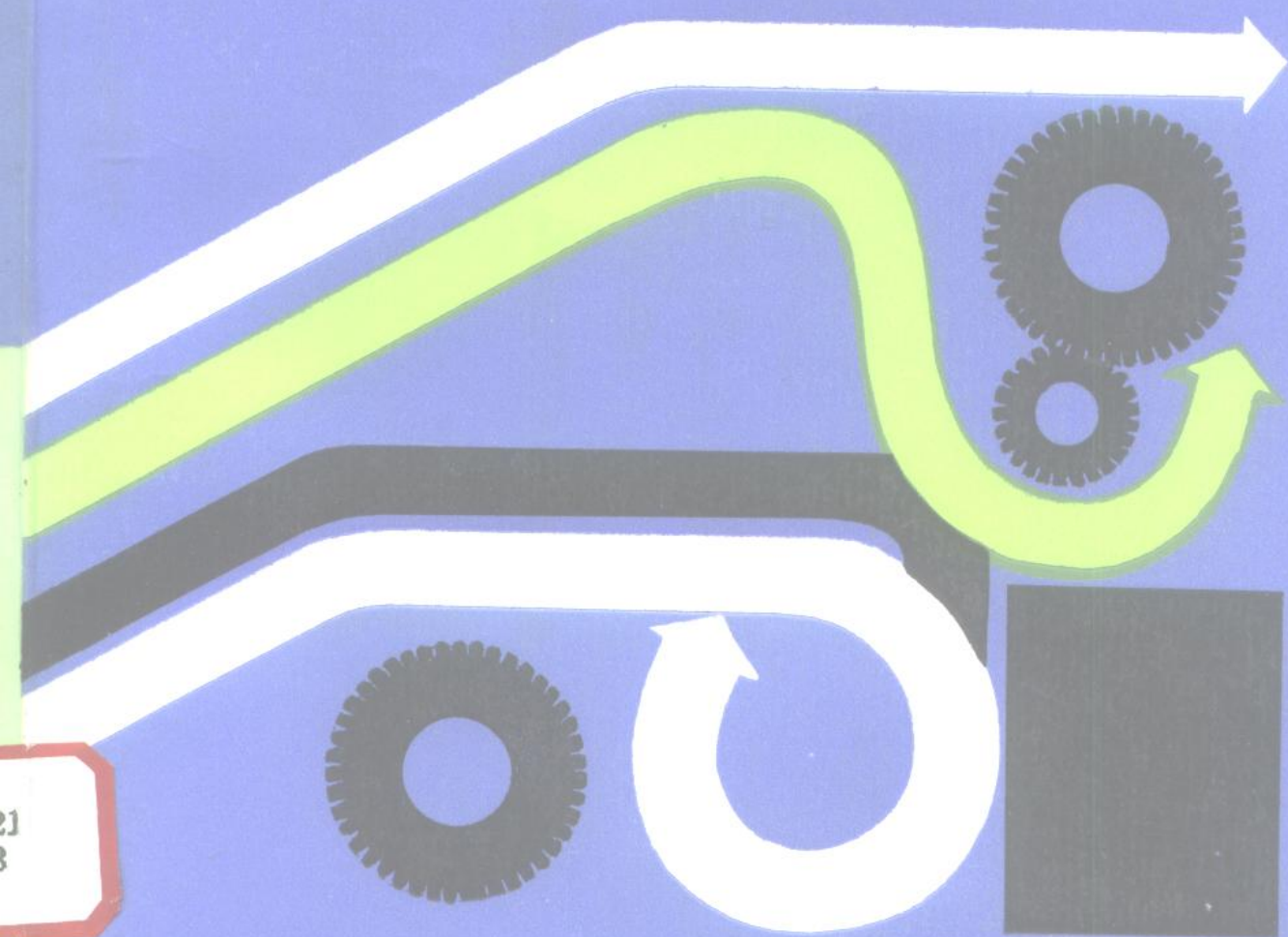


# 电气传动及应用

杨兴瑶 编



化学工业出版社

# 电气传动及应用

杨兴瑶 编

化学工业出版社

北京

(京)新登字039号

## 内 容 简 介

本书主要介绍起重机械、电梯、提升机械、输送机械、建筑机械、采矿机械、锻压机械、轧钢机械、金属切削机床、泵、空气压缩机、通风机械、化工机械、纺织机械、轻工机械、农用机械、电动工具以及日用电器中的电气设备和电气传动,分析各种工作机械负载力和转矩的计算方法以及功率选择的原则,介绍主要的控制线路和传动系统的结构。

书中在前三章中分别介绍了工作机械的特性及其计算的一般公式、电动机的特性及其选择原则和电动机常用的控制线路及控制系统,其中包括大量的实例,以使读者更好地理解这些计算和选择以及控制线路和系统的原理。

本书对从事电气设备设计、制造、维修和使用的工程技术人员、技术工人以及各类学校的电气和机械类师生有较全面的参考价值。

## 电 气 传 动 及 应 用

杨兴瑞 编

责任编辑:刘 哲

封面设计:聂崇文

化学工业出版社出版

(北京市朝阳区惠新里3号)

科教印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092<sup>1/16</sup>印张 24 字数 600 千字

1994年8月第1版 1994年8月北京第1次印刷

印 数 1-3550

ISBN 7-5025-1309 -4/TM·7

定 价 23.00 元

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 绪论                           | 1  |
| 本书主要文字符号的意义                  | 4  |
| 第1章 工作机械的特性及其计算的一般公式         | 6  |
| 1.1 行程、转角及其相关量的确定            | 6  |
| 1.1.1 行程、转角、速度和角速度的计算公式和特性曲线 | 6  |
| 1.1.2 加速度、角加速度及其变化率          | 7  |
| 1.1.3 旋转运动与直线运动的传递机构         | 9  |
| 1.2 力和转矩及其相关量的确定             | 10 |
| 1.2.1 阻力和阻转矩                 | 10 |
| 1.2.2 工作机械的机械特性              | 11 |
| 1.2.3 加速力和加速转矩               | 12 |
| 1.2.4 运动平衡方程式                | 14 |
| 1.3 典型工作机械传动功率的确定            | 16 |
| 1.3.1 切削机床                   | 16 |
| 1.3.2 起重机                    | 19 |
| 1.3.3 电梯                     | 20 |
| 1.3.4 电车                     | 21 |
| 1.3.5 通风机                    | 22 |
| 1.3.6 泵                      | 23 |
| 1.4 传动系统中储存的动能和运动的不均匀度       | 24 |
| 1.5 传动系统运动过程和负载过程的基本类型       | 25 |
| 第2章 电动机的特性及其选择原则             | 28 |
| 2.1 电动机的类型和结构尺寸              | 28 |
| 2.1.1 电动机的类型                 | 28 |
| 2.1.2 电动机的结构尺寸               | 29 |
| 2.2 直流电动机的特性和运行方式            | 31 |
| 2.2.1 直流电动机的分类和机械特性          | 31 |
| 2.2.2 他励直流电动机的调速方式           | 34 |
| 2.2.3 他励直流电动机的起动             | 36 |
| 2.2.4 他励直流电动机的制动             | 38 |
| 2.3 异步电动机的特性和运行方式            | 40 |
| 2.3.1 异步电动机的分类和机械特性          | 40 |
| 2.3.2 异步电动机的调速方式             | 44 |
| 2.3.3 异步电动机的起动               | 50 |
| 2.3.4 异步电动机的制动               | 50 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 2.4 电动机的选择 .....                  | 53         |
| 2.4.1 影响电机寿命的机械和发热因素 .....        | 53         |
| 2.4.2 电机的发热和损耗 .....              | 54         |
| 2.4.3 温度变化曲线 .....                | 56         |
| 2.4.4 利用等效损耗法确定电动机的功率 .....       | 58         |
| 2.4.5 按运行状态确定额定功率 .....           | 60         |
| <b>第3章 电动机的控制线路和控制系统 .....</b>    | <b>71</b>  |
| 3.1 直流电动机的控制线路 .....              | 71         |
| 3.1.1 直流电动机的起动线路 .....            | 71         |
| 3.1.2 直流电动机的反转线路 .....            | 74         |
| 3.1.3 直流电动机的制动线路 .....            | 74         |
| 3.2 异步电动机的控制线路 .....              | 78         |
| 3.2.1 异步电动机的起动线路 .....            | 78         |
| 3.2.2 异步电动机的反转线路 .....            | 80         |
| 3.2.3 异步电动机的制动线路 .....            | 81         |
| 3.3 直流电动机调速系统 .....               | 83         |
| 3.3.1 具有电压、电流和电势反馈的直流调速系统 .....   | 83         |
| 3.3.2 具有测速负反馈的单闭环调速系统 .....       | 85         |
| 3.3.3 具有电流负反馈和速度负反馈的双闭环调速系统 ..... | 86         |
| 3.3.4 具有电流截止特性的调速系统 .....         | 87         |
| 3.4 异步电动机调速系统 .....               | 88         |
| 3.4.1 晶闸管控制异步电动机调速系统的类型 .....     | 88         |
| 3.4.2 异步电动机定子交流调压调速系统 .....       | 88         |
| 3.4.3 异步电动机变频调速系统 .....           | 92         |
| 3.4.4 异步电动机-电磁转差离合器调速系统 .....     | 96         |
| 3.4.5 具有转子侧整流器控制的异步电动机调速系统 .....  | 97         |
| <b>第4章 起重机械的电气传动 .....</b>        | <b>100</b> |
| 4.1 起重机械的典型结构、分类和效率计算 .....       | 100        |
| 4.2 起重机械的负载计算 .....               | 103        |
| 4.3 起重机械静态功率的计算 .....             | 105        |
| 4.4 起重机械电动机和制动装置的选择 .....         | 107        |
| 4.4.1 按静态功率选择电动机 .....            | 107        |
| 4.4.2 按等效功率选择电动机 .....            | 110        |
| 4.4.3 制动装置基本参数的选择 .....           | 112        |
| 4.5 起重机械的电器控制线路 .....             | 112        |
| 4.6 起重机械电气传动控制系统 .....            | 117        |
| 4.6.1 直流电动机控制系统 .....             | 117        |
| 4.6.2 异步电动机控制系统 .....             | 121        |
| <b>第5章 提升机械与输送机械的电气传动 .....</b>   | <b>127</b> |
| 5.1 电梯的电气传动 .....                 | 127        |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 5.1.1      | 电梯的基本分类和结构            | 127        |
| 5.1.2      | 对电梯电气传动系统提出的主要要求      | 129        |
| 5.1.3      | 电梯的电器控制线路和系统          | 130        |
| 5.2        | 提升机械的电气传动             | 134        |
| 5.2.1      | 提升机械的运动线路和功率计算        | 134        |
| 5.2.2      | 提升机械的控制线路和系统          | 135        |
| 5.2.3      | 卷扬机自动控制线路             | 137        |
| 5.3        | 连续输送机的电气传动            | 139        |
| 5.3.1      | 连续输送机的类型和典型结构         | 139        |
| 5.3.2      | 输送机的静态负载和电动机功率的确定     | 141        |
| 5.3.3      | 对输送机电气传动装置提出的要求       | 143        |
| 5.3.4      | 输送机电气传动的典型控制线路        | 144        |
| 5.4        | 装卸机械的电气传动             | 147        |
| 5.4.1      | 装车机和卸车机的电气传动          | 147        |
| 5.4.2      | 堆垛机的电气传动              | 149        |
| 5.4.3      | 斗轮堆取料机的电气传动           | 149        |
| 5.5        | 叉车的电气传动               | 152        |
| <b>第6章</b> | <b>建筑机械和采矿机械的电气传动</b> | <b>154</b> |
| 6.1        | 混凝土搅拌机的电气设备           | 154        |
| 6.2        | 挖掘机的电气传动              | 156        |
| 6.2.1      | 挖掘机的种类和构造             | 156        |
| 6.2.2      | 挖掘机驱动电动机功率的计算         | 159        |
| 6.2.3      | 对挖掘机电气传动装置提出的要求       | 160        |
| 6.2.4      | 挖掘机的控制线路              | 161        |
| 6.3        | 钻探设备的电气传动             | 163        |
| 6.3.1      | 钻探设备的类型               | 163        |
| 6.3.2      | 对钻探设备电气传动提出的基本要求      | 164        |
| 6.3.3      | 钻探机构电气传动的计算           | 167        |
| 6.3.4      | 钻探机构电气传动装置的控制线路       | 173        |
| <b>第7章</b> | <b>锻压机械的电气传动</b>      | <b>180</b> |
| 7.1        | 锻压机械电气传动的类型和负载特点      | 180        |
| 7.2        | 机械式锻压机飞轮电气传动的计算       | 181        |
| 7.3        | 锻压机械的控制线路和传动系统        | 187        |
| 7.3.1      | 锻压机械的控制线路             | 187        |
| 7.3.2      | 锻压机械主传动的电气调速系统        | 190        |
| <b>第8章</b> | <b>轧机电气传动</b>         | <b>195</b> |
| 8.1        | 轧制生产概述                | 195        |
| 8.1.1      | 轧机和机架的分类              | 195        |
| 8.1.2      | 轧制转矩的确定               | 198        |
| 8.1.3      | 主轧机设备中的电机             | 200        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 8.2 可逆热轧机的自动化电气传动系统              | 205 |
| 8.2.1 轧机的工艺特点和结构特点及对轧机电气传动系统的要求  | 205 |
| 8.2.2 可逆热轧机主电气传动的供电系统            | 209 |
| 8.2.3 可逆热轧机电气传动控制系统的特点           | 210 |
| 8.3 热连轧机的自动化电气传动                 | 213 |
| 8.3.1 热连轧机的工艺特点和结构特点             | 213 |
| 8.3.2 热连轧机的电气传动及其控制系统            | 215 |
| 8.3.3 宽带轧机精轧组主动传动的控制线路           | 217 |
| 8.4 冷轧机的自动化电气传动                  | 220 |
| 8.4.1 冷轧机的设备、工艺状态和对电气传动提出的要求     | 220 |
| 8.4.2 工作机架和卷取装置电动机的电气传动和供电系统     | 221 |
| 8.4.3 机架电气传动的控制线路                | 222 |
| 8.4.4 卷绕装置电气传动控制系统的构成原理          | 223 |
| 8.4.5 间接作用式调节器中的误差及其补偿           | 224 |
| 8.4.6 卷取机电气传动的控制线路               | 226 |
| 8.5 辅助机构的自动化电气传动                 | 227 |
| 8.5.1 辅助机构的工艺特点和结构特点及其对电气传动提出的要求 | 227 |
| 8.5.2 辅助机构的电气传动及电动机的供电系统         | 238 |
| 8.5.3 辅助机构的控制系统                  | 238 |
| <b>第9章 金属切削机床的电气传动</b>           | 244 |
| 9.1 金属切削机床的分类及其电气传动的形式           | 244 |
| 9.2 对机床电气传动提出的基本要求               | 246 |
| 9.3 金属切削机床电气传动功率的确定              | 252 |
| 9.4 金属切削机床电气传动的成套装置              | 258 |
| 9.4.1 不可逆直流电气传动系统                | 260 |
| 9.4.2 电枢反向的可逆直流电气传动系统            | 263 |
| 9.4.3 磁场反向的可逆直流电气传动系统            | 264 |
| 9.4.4 晶体管PWM型电气传动系统              | 265 |
| 9.5 金属切削机床电气传动系统中的电动机            | 268 |
| 9.5.1 主运动机构传动用直流电动机              | 268 |
| 9.5.2 主运动机构传动用交流电动机              | 269 |
| 9.5.3 电动主轴                       | 269 |
| 9.5.4 进给机构电气传动用电动机               | 271 |
| <b>第10章 泵、空气压缩机和通风机的电气传动</b>     | 274 |
| 10.1 涡轮机构的机械特性                   | 274 |
| 10.2 离心泵的工作特点及其对电气传动提出的要求        | 278 |
| 10.3 通风机的特点及其对电气传动提出的要求          | 281 |
| 10.4 涡轮压缩机的工作特点及其对电气传动提出的要求      | 284 |
| 10.5 涡轮机构电气传动系统的分类               | 285 |
| 10.6 活塞式机械的电气传动                  | 287 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第11章 化学工业机械的电气传动</b>        | 290 |
| 11.1 化工机械的基本类型                 | 290 |
| 11.2 化工企业中电气设备的工作条件和对电气设备的防护方式 | 291 |
| 11.3 磨碎-破碎机构和筛选机构的电气传动         | 292 |
| 11.4 回转炉、干燥机和搅拌机的电气传动          | 294 |
| 11.5 蜗杆机械和混橡机的电气传动             | 296 |
| 11.6 辊压机的电气传动                  | 300 |
| 11.7 搅拌机和离心机的电气传动              | 302 |
| <b>第12章 纺织工业和轻工业机械的电气传动</b>    | 307 |
| 12.1 设备的一般特点                   | 307 |
| 12.2 纺织机械的机械特性和负载              | 307 |
| 12.3 纺纱机的电气传动                  | 311 |
| 12.4 捻线机的电气传动                  | 316 |
| 12.5 织造生产机械的电气传动               | 317 |
| 12.6 针织生产机械的电气传动               | 321 |
| 12.7 非织造生产机械的电气传动              | 321 |
| 12.8 染整生产机械和机组的电气传动            | 322 |
| 12.9 织物后处理用机械和设备的电气传动          | 325 |
| 12.10 洗涤机的电气传动                 | 326 |
| <b>第13章 农业生产机械的电气传动</b>        | 327 |
| 13.1 农业生产机械的分类及其对电气传动提出的要求     | 327 |
| 13.2 电气传动设备的选择                 | 330 |
| 13.2.1 谷物处理类机械                 | 330 |
| 13.2.2 磨碎、破碎和搅碎类机械             | 334 |
| 13.2.3 块根块茎处理类机械               | 336 |
| 13.2.4 饲料处理类机械                 | 338 |
| 13.2.5 蛋奶处理类机械                 | 342 |
| 13.2.6 畜肥处理类机械                 | 344 |
| 13.2.7 羊毛成包机                   | 346 |
| 13.2.8 锯床和刨床类机械                | 346 |
| 13.2.9 粘土处理类机械                 | 348 |
| 13.2.10 汽车、拖拉机发动机试验运转和试验用平台    | 350 |
| <b>第14章 电动工具和日用电器中的电气传动</b>    | 352 |
| 14.1 小功率电动机及其电气传动的特点和控制线路      | 352 |
| 14.1.1 小功率直流电气传动               | 352 |
| 14.1.2 单相串激电动机的特性及其控制线路        | 355 |
| 14.1.3 单相异步电动机的类型及其控制线路        | 356 |
| 14.2 电动工具的电气控制                 | 359 |
| 14.2.1 电动工具的分类、代号和主要的技术要求      | 359 |
| 14.2.2 电动工具的控制线路               | 360 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 14.3 日用电器中的电气传动 .....   | 362 |
| 14.3.1 空调器的电气控制线路 ..... | 362 |
| 14.3.2 电冰箱的电气控制线路 ..... | 364 |
| 14.3.3 洗衣机的电气控制线路 ..... | 365 |
| 主要参考文献 .....            | 368 |

## 绪 论

与其它能源相比，电能具有稳定、高效、便于输送和控制的优点，因此在总能源中占有最重要的地位。而在电能消耗总量中用于电动机方面的能量又占半数以上。可见，研究和利用好这一部分能量对国民经济具有重要的意义。

本书研究的电气设备是指以电动机作为动力的机械设备，主要完成对固体、液体或气体物料的输送（如起重机、提升机、皮带输送机、装卸机）、加工（如机床、轧钢机、纺织机、缝纫机）、压缩（如锻压机、压力机、辊压机、模具成形机）、混合（如搅拌机、混合机、风机）及分离（如分离机、选分机）等工作。在完成上述生产过程中投入的主要能量是动力（电力）和劳力。要尽可能地将劳力转换成动力，以节省劳力。在做功过程中还可能加入各种形式的自然能（如风力、重力），而更主要的是表现在损耗方面。这些损耗包括电动机损耗、传递机构的损耗、多余功的损耗以及控制方面的损耗等。因此，电气设备的第二个任务就是在保证完成工作任务的情况下有最少的损耗。

省力和节能是电气设备的两个主要任务，对此应当从以下几方面着手考虑：

（1）动力和劳力配置是否恰当。由于机械工业和电子工业的迅速发展，特别是计算机的出现，使得电气设备的功能不仅在于减轻体力劳动的强度和完成人工所完成不了的工作，而且在某种程度上也减轻了脑力劳动强度，出现了计算机控制和管理广泛应用的新局面。在这方面，无人工厂可以说是走向省力化的最高点了。但这不是说，任何机器或设备的工作都完全不需要人去参与才是最好的。事实上绝大多数机器或设备都必须直接或间接地由人来监视和操作。操作人员的职能是根据测量装置和显示装置提供的信息，判断过程进行中机器或设备的状态，并根据操作规程、指示和经验，决定操作按钮或手柄的位置，通过手动相应的操作元件，即可实现需要的操作。在这方面分工好哪些由人去操作，哪些由机器自动完成是很重要的。因为有时增加一些手动操作可以大大简化系统的复杂程度和成本，有时减少一些手动操作又可以大大减轻操作人员的精神负担和体力消耗。

（2）设备容量是否适合于生产率的要求。设备容量不足，必然会减少产量；但设备容量过大，不仅投资高，而且还使效率降低。现以扬水泵为例，如图1(a)所示，用开关控制一种是图1(b)所示，采用时通时断的控制方式；另一种是图1(c)所示，采用连续运行方式。两者做功一样，若忽略电机内部损耗，则平均用电量和总用电量也一样。但显然，对于图1(b)方式，电机功率及供电电源功率都要增加，设备费以及由于最大用电量增加引起的电费也要增加，这是不经济的。因此，对于做功来说，最合适的容量就是能维持一定速度和一定负载连续运转的容量，如图1(c)所示。由此看来，根据生产要求选用合适的动力源容量，防止“大马拉小车”或“小马拉大车”是非常重要的。

（3）控制方案是否合理。电机的转矩和速度变化规律取决于负载的需要。在有些情况下负载恒定，转速也恒定，此时可以采用不可调传动，通过继电器、接触器等元件即可实现电机的起停运转。但在很多情况下负载是变化的，为了保证产品质量，必须要稳定电机的转速，或者根据工艺要求适时地改变电机的转速，这时就应当采用可调传动。采用可调传动也是节省能量所必须的。比如图1中，若供水量是变化的，如采用恒速电动机和可变阀门来实

现调节,显然是不经济的。合理的调节方式应是采用调速电动机的变速传动方式,这时电机输入能量根据输出能量需求的大小来调节,从而防止了能量白白浪费掉。

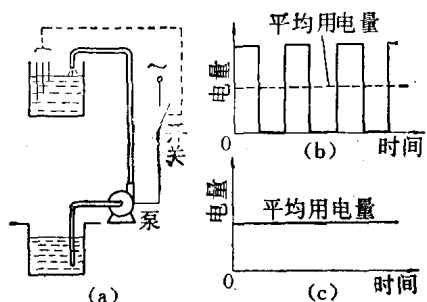


图 1 不同控制方式的扬水装置工作情况  
(a) 扬水装置; (b) 装置容量过大; (c) 装置容量适中

(4) 自然能是否有效利用。在电气设备运行中存在着由重力势能或运动动能储存的能量,这些能量有时会多余出来(如由落差引起的能量),如果不加以回收利用,它们往往会以冲击能或热能的形式散失掉。相反,如果把这部分能量再转化为有用功或能量,则会明显提高效率。在电机减速或停止过程中采用再生发电制动,即可把多余的动能变换成电能送回电网,在起重和提升装置下放货物时也可以把

势能转化为电能加以利用。

(5) 传递机构的选择是否合适。如果将电动机轴直接经过联轴节与负载机械轴相连接,其效率当然高,但一般负载需要低转速和高转矩,而电机轴输出的恰好相反。为此经常采用传递机构来使电动机的运动参数与负载变量相匹配。传递机构有各种不同的形式,它们各有优缺点和适用场合。皮带轮传递,会因打滑而增加摩擦损耗,故效率较低,但它能对急剧变化的负载有缓冲作用,对机构安全有利。齿轮传递,可有效地传递转矩,属于刚性连接。这两种传递机构如果要变速,只能通过改变轮子直径有级地调节。利用电磁离合器可以实现无级调节转矩和转速,但输入与输出速度间的转差越大,亦即输出速度越低,效率越低。最理想的方法是尽量扩大可调节能电动机的调节范围,减小中间传递机构环节。实际工作中必须根据需要将电气调速和制动与机械变速与制动恰当地结合起来。

综上所述可知,电气设备除了包括电能源、电动机、传递机构和工作机械以外,常常还要有控制电动机能流大小的变流装置和为此而设置的控制调节装置以及反馈装置等。这样一整套装置构成的系统通常称为电气传动系统,如图 2 所示。电气传动系统可以按照用途分,

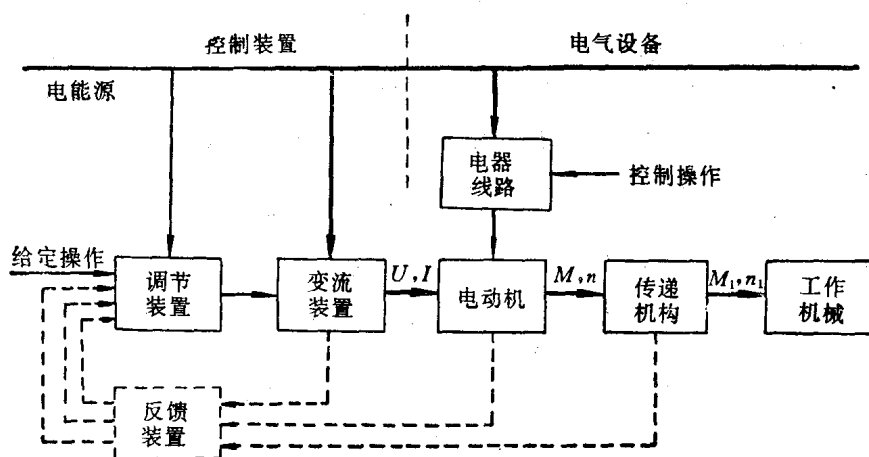


图 2 电气传动系统的组成

有主传动系统,用以保证工作机械主运动(如车床主轴运动)或过程基本操作,和辅助传动

系统,用以保证工作机械辅助运动(如车床进给运动)或辅助操作;按照运动方式分有单方向运转的不可逆传动系统和双方向运转的可逆传动系统;按照电动机类型分有直流传动系统和交流传动系统;按照机组形式分有单独电动机传动系统和成组多电动机传动系统,等等。

电气传动系统的负载量亦即输出量或被调节参数通常是转矩、转速或功率,而控制量一般为电压或电流,在某些情况下为电压或电流的频率或相位。

正确设计电气传动系统必须以自动调节理论为指导,通过实验、整定、仿真和不断调试完善,最后才能获得最佳的调节器参数值。

表1示出主要的工艺过程及对电气传动系统提出的稳态和动态要求。

表1 主要的工艺过程及对电气传动系统提出的要求

| 工艺过程                    | 工作机械和机构                      | 对执行机构的典型要求                                                            | 电气传动的功能                                                                                                                               |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 材料和零件的制造与加工             | 金属加工和木材加工机床,轧钢机,纺织机,造纸机,电动工具 | 单向或可逆直线运动,单向或可逆旋转运动,直线往复运动,在空间给定位置上精确定位,调节速度和加速度,调节转矩和力,保持速度或转矩(力)恒定。 | 起动,反转和停止(制动),调节速度和加速度,保持被加工材料有恒定张力,维持几个执行机构的协调运动,保证按给定程序运动,保证按任意变化的输入信号的函数运动(随动),使过程达到最佳状态,对工艺过程的变化实现自适应调节,对复杂过程实现综合自动化,对设备的工作实现保护和联锁 |
| 材料和零件的移动,人和货物的输送        | 运输工具,卷扬机,起重机,升降机,电梯,架空索道     |                                                                       |                                                                                                                                       |
| 液体和气体的移动                | 泵,风机,排烟机,压缩机                 |                                                                       |                                                                                                                                       |
| 日用电器                    | 空调机,冰箱,电扇,洗衣机,吸尘器,搅拌机        |                                                                       |                                                                                                                                       |
| 开采矿物                    | 挖掘机,钻探设备,采煤机                 |                                                                       |                                                                                                                                       |
| 遥控和无线电装置,自动机操作,材料和零件的试验 | 无线电望远镜,卫星接收站,机器人,绘图机,试验台     |                                                                       |                                                                                                                                       |

本书综合上述指导思想,分门别类地介绍主要类型工作机械的电气设备和传动系统应用方面的问题,包括各种设备传动的基本计算和选择方法,对传动系统提出的要求,常用控制线路和系统,以及其它一些与此有关的问题。

为了便于读者选用电气传动装置,书末附录有几种在工业中广泛应用的产品规格介绍,即宁波北仑电子成套厂和丰华整流设备厂的直流和单相交流调速装置、苏州电机厂的中、小功率变频调速装置、江苏万力达电器公司的中、大功率变频调速装置、山东乳山电机厂的电磁调速电动机以及泰兴电子控制设备厂和华龙调速电机厂的电磁转差离合器和控制器等。

编写本书得到了兵器工业总公司秦忠伦高工和南京理工大学郭治教授的热情帮助,以及石银根、钟芳渊、洪文治、徐宝喜、于守海、张成和金家兴等厂长的大力支持,对此作者表示深切感谢。

迄今国内尚没有一本全面介绍各领域应用电气设备和电气传动的专门书籍可供借鉴,要在如此多的专业范围中选择出有代表性的典型机构类型、传动装置和控制系统,并加以系统化、统一化,从应用出发,然后再回到应用中去,需要投入大量的人力和物力。有鉴于此,本书难免会有各种缺点,对此欢迎读者不吝指正。

## 本书主要文字符号的意义

### 1. 机电系统中常用的文字符号的意义

|                     |                         |                 |
|---------------------|-------------------------|-----------------|
| $P$ 功率, 电磁功率, 内在功率  | $P_{\omega}$ 同转速有关的损耗功率 | $U_f$ 反馈电压      |
| $P_C$ 不变损耗功率        | $P_s$ 附加损耗功率            | $U_K$ 控制电压      |
| $P_{Cu1}$ 定子铜损耗功率   | $P_r$ 制动损耗功率            | $I$ 电流          |
| $P_{Cu2}$ 转子铜损耗功率   | $M$ 转矩, 驱动转矩, 电磁转矩      | $I_C$ 吸合电流      |
| $P_{Cuf}$ 励磁绕组铜损耗功率 | $M_d$ 动态转矩              | $I_{cd}$ 环流     |
| $P_d$ 动态功率          | $M_{ef}$ 有效转矩           | $I_F$ 释放电流      |
| $P_a$ 平均功率          | $M_L$ 静态负载转矩            | $I_f$ 直流励磁电流    |
| $P_{ef}$ 有效功率       | $M_0$ 空载转矩              | $I_a$ 异步电动机励磁电流 |
| $P_{Fe}$ 铁损耗功率      | $M_R$ 轧制转矩              | $I_{st}$ 起动电流   |
| $P_K$ 产品目录中铭牌功率     | $M_{st}$ 起动转矩           | $I_z$ 制动电流      |
| $P_L$ 静态负载功率        | $M_T$ 摩擦转矩              | $t$ 时间          |
| $P_{Lv}$ 同负载有关的损耗功率 | $M_z$ 制动转矩              | $t_H$ 工作时间      |
| $P_m$ 机械功率          | $n$ 转速, 每分钟转数           | $t_0$ 间歇时间      |
| $P_0$ 空载损耗功率        | $n_0$ 空载转速              | $t_q$ 起动时间      |
| $P_P$ 计算的功率         | $n_s$ 同步转速              | $t_T$ 过渡过程时间    |
| $P_q$ 起动功率          | $\omega$ 角速度, 角频率       | $t_z$ 制动时间      |
| $P_T$ 摩擦损耗功率        | $\omega_0$ 空载角速度        | $T$ 周期, 时间常数    |
| $P_v$ 总损耗功率         | $\omega_s$ 同步角速度        | $T_a$ 电枢绕组时间常数  |
| $P_{\omega}$ 等效损耗功率 | $U$ 电压, 线电压             | $T_f$ 励磁绕组时间常数  |
| $P_{v1}$ 同电流有关的损耗功率 | $U_s$ 给定电压              | $T_{me}$ 机电时间常数 |

### 2. 最常用的下角文字符号的意义

|        |        |             |
|--------|--------|-------------|
| $a$ 电枢 | $e$ 等效 | $M$ 电动机, 机械 |
| $d$ 直流 | $f$ 励磁 | $N$ 额定      |

### 3. 主要元件、单元和环节的简写字母代号

|            |                 |                |
|------------|-----------------|----------------|
| $A$ 放大器    | $G$ 发电机         | $MD$ 乘除装置      |
| $BO$ 限制环节  | $GS$ 锯齿波发生器     | $ME$ 绝对值运算器    |
| $C$ 电容器    | $IF$ 积分器        | $MK$ 复合装置      |
| $CF$ 触发器   | $IJ$ 惯性环节       | $MT$ 负载调节器     |
| $CP$ 计算装置  | $J$ 转动惯量        | $NL$ 非线性环节     |
| $CT$ 环流调节器 | $JB$ 极性鉴别器      | $PT$ 转子功率调节器   |
| $DF$ 微分器   | $K$ 继电器 (第一个字母) | $QT$ 无功功率调节器   |
| $DI$ 除法器   | $L$ 电感, 电抗器     | $R$ 电阻器        |
| $DK$ 加法器   | $LK$ 逻辑装置       | $RP$ 电位器       |
| $ET$ 电势调节器 | $LT$ 电流调节器      | $S$ 按钮 (第一个字母) |
| $FI$ 滤波器   | $LTL$ 励磁电流调节器   | $SE$ 电势发送器     |
| $FS$ 函数发生器 | $M$ 电动机         | $SI$ 电流发送器     |

SIL 励磁电流发送器  
 SM 主令控制器  
 ST 速度调节器  
 SU 电压发送器  
 TG 测速发电机  
 U 变流器

UF 变频器  
 UFD 直接变频器  
 UI 逆变器  
 UR 整流器  
 V 半导体管, 晶闸管

VD 二极管  
 VT 三极管  
 YB 电磁制动器  
 YT 电压调节器  
 $\Phi$ I 磁通调节器

#### 4. 其余主要文字符号的意义

A 功, 面积, 散热系数  
 a 加速度  
 B 磁感应强度  
 C 电容量, 热容量, 电机  
 利用系数  
 D 调速范围, 直径  
 d 直径, 深度  
 E 电势  
 F 力, 驱动力  
 FC 负载持续率, 持续导通  
 率  
 $F_d$  动态力  
 FI 惯性因数  
 $F_T$  静态阻力  
 $F_f$  摩擦力  
 $F_c$  切削力, 制动力  
 f 频率, 力

G 重量  
 g 重力加速度, 电流系数  
 H 高度, 扬程 (压头)  
 h 磁滞损耗系数  
 i 电流, 传动比  
 J 转动惯量  
 K 常数  
 $K_M$  过载系数  
 l 长度  
 m 质量, 相数  
 N 延伸系数  
 $N_h$  每小时工作次数  
 p 压力, 拉普拉斯算子,  
 极数  
 Q 流量, 起重量  
 R 电阻  
 $R_a$  附加电阻

r 半径, 加速度的变化率  
 s 行程, 距离  
 $S_n$  每小时接通次数  
 s 转差率  
 $S_n$  每转走刀量 (进给量)  
 T 张力, 周期  
 t 螺距  
 V 体积  
 W 能量  
 $W_r$  阻力系数  
 w 匝数  
 X 电抗  
 $X_{10}, X_{20}$  异步电动机定、转子  
 漏抗  
 $X_m$  异步电动机励磁电抗  
 z 起动电阻级数

# 第1章 工作机械的特性及其计算的一般公式

工作机械是电气传动系统的控制对象，电气传动系统的任务就是控制工作机械的运动过程。在这种运动过程中，固态、液体或气态物体将改变地点，即被分离、拉近或连接，或者改变其性能、形状或形态。例如，在起重机、提升机、电梯、连续输送机以及运输车辆中，主要是改变物体的地点；在车床、铣床、钻床、冲床、剪床、锯床中，主要是改变物体的形状；在泵、通风机、空气压缩机中，主要是改变物体的地点和形态；在轧机、压延机、压力机、弯曲机中则主要改变物体的性能和形态。

为了实现上述过程，需要机械能，在电气传动中，这些机械能由机电能量变换装置（电动机、电磁铁等）中来。因此，控制运动过程实际上就是控制能量流动过程。电气传动的基本任务可以归结为以下几点：

- (1) 将电能转换为机械能以完成工艺过程，其中能量的损耗应当尽可能地少；
- (2) 按照工艺过程的要求，提供所需要的力、转矩、速度或角速度等；
- (3) 按照生产流程的要求，通过控制装置控制机械功率，以使工艺过程有最高的效率，使产品有最高的生产率和质量指标。

## 1.1 行程、转角及其相关量的确定

行程  $S$  和转角  $\theta$  是运动过程的基本量，并且是随时间变化的，因此又有速度  $v$  和角速度  $\omega$ 、加速度  $a$  和角加速度  $\varepsilon$  等导出量。

### 1.1.1 行程、转角、速度和角速度的计算公式和特性曲线

行程  $S$  常以米 (m) 为单位，角度  $\theta$  常以度 ( $^\circ$ )、弧度 (rad) 或转 (r) 为单位：

$$1\text{r} = 360^\circ = 2\pi\text{rad} \text{ 或 } 6.28\text{rad}$$

速度  $v$  是行程对时间的导数，即：

$$v = \frac{dS}{dt} \quad \text{m/s}$$

角速度：

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{rad/s}$$

上式单位在不致混淆情况下可简写成  $1/\text{s}$ 。

转速或转数  $n$  表示单位时间内旋转的周数：

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega = 60f \quad \text{r/min}$$

式中  $f$  为旋转频率，为了与普通频率单位 Hz 区别，其单位应写作  $\text{r/s}$ 。

图1-1示出以同样角速度运动的两点 1 和 2 具有不同线速度矢量：

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$ ——点 1 和 2 的旋转直径。

速度和角速度是计算机械功率必不可少的物理量。

### 1.1.2 加速度、角加速度及其变化率

加速度  $a$  和角加速度  $\varepsilon$  分别为速度和角速度对时间的变化率:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} \quad \text{m/s}^2$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{rad/s}^2$$

对于匀加速度和匀角加速度, 即  $a = \text{常数}$ ,  $\varepsilon = \text{常数}$ , 有:

$$v = at + v_0$$

$$S = \frac{a}{2} t^2 + v_0 t + S_0$$

$$\omega = \varepsilon t + \omega_0$$

$$\theta = \frac{\varepsilon}{2} t^2 + \omega_0 t + \theta_0$$

式中  $v_0$ 、 $\omega_0$ 、 $\theta_0$ ——速度、角速度和转角的初始值。

加速度和角加速度对于确定过渡状态 (如起动或制动状态) 的最大动态功率及最佳动态过程具有重要的意义。

实际中有时用到加速度和角加速度的变化率:

$$r = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{d^3S}{dt^3} \quad \text{m/s}^3$$

$$r = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{d^3\theta}{dt^3} \quad \text{rad/s}^3$$

这两个量对研究机械传递装置的最大负荷具有重要的意义。例如在电梯中, 如果  $r = da/dt > 2.5 \text{ m/s}^3$ , 人就会有很不舒服的感觉。

对于各种工艺过程, 一般要求精确地确定行程  $S$ 、速度  $v$  和加速度  $a$ , 而加加速度  $r = da/dt$  在一般情况下由于机械惯性和物体的弹性而不需要确定。表 1-1 示出几种典型工作机械的  $S$ 、 $v$ 、 $a$  的数值范围。

**例 1-1** 一座工业建筑楼高 8m。要求以尽可能短的时间使提升机升至顶部, 并且不要超过允许的运行极限值:  $r = \pm 1.5 \text{ m/s}^3$ ,  $a_{\max} = \pm 1 \text{ m/s}^2$ ,  $v_{\max} = \pm 2 \text{ m/s}$ 。根据运行的行程-时间曲线, 检验运用值是否合适, 并求出总运行时间。

**解**, 运行流程可以分七步, 前三步要使提升机加速到  $v_{\max}$ 。首先计算这一段的行程和时间, 如表 1-2 所示。

从表中计算结果可知, 在经过  $2\frac{2}{3} \text{ s}$ , 运行  $2\frac{2}{3} \text{ m}$  后达到  $v_{\max}$  值。后三步从  $v_{\max}$  减速到零, 这一段

过程也是经过  $2\frac{2}{3} \text{ s}$ , 运行  $2\frac{2}{3} \text{ m}$ 。中间一步即第 4 步保持匀速 ( $v_{\max}$ ) 运动, 行程为  $S_4 = 8 - 2\frac{2}{3} -$

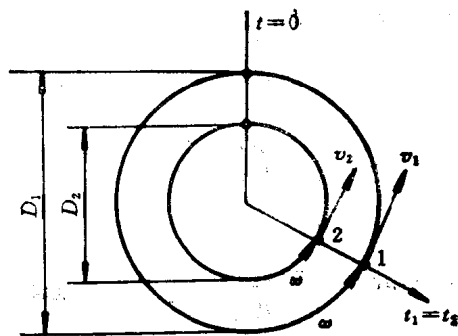


图 1-1 角速度  $\omega$  与线速度  $v$  的关系

表 1-1 典型工作机械的典型  $S$ 、 $v$ 、 $a$  值范围

| 工作机械    | 工作类型    | $S, m$  | $v, m/s$               | $a, m/s^2$          |
|---------|---------|---------|------------------------|---------------------|
| 起重-提升机械 | 提升      | 1~50    | 0.05~0.5               | 0.1或0.2~0.5或0.8~0.1 |
|         | 微速提升    | —       | 0.005~0.02             | 0.2~0.8(1.4)        |
|         | 小车运行    | 至10~50  | 0.2~1                  | (0.1)0.4~1.4        |
|         | 起重运行    |         | 0.4~2                  |                     |
| 电梯      | 载人      | 至10~300 | (0.25)0.5~5(8)         | (0.15)0.3~1.2       |
| 矿井提升机   | 载人      | 至1000   | 3~8                    | 0.8~1.5             |
|         | 载货      |         | 15~20(30)              | 0.8~1.5             |
| 带式输送机   | 载物料     | 至5000   | 0.2~4                  | 0.2~0.5             |
| 运输工具    | 电车      | —       | 40~60km/h              | 1~1.2               |
|         | 高速机车    | —       | 80~120(300)km/h        | 0.8~1.2             |
| 机床      | 主轴车削工具: | —       | —                      | —                   |
|         | 高速钢     | —       | (0.3)~0.5~(0.85)       | —                   |
|         | 硬质合金钢   | —       | (0.7)~2.5~(3.4)        | —                   |
|         | 陶瓷      | —       | $\approx 5$            | —                   |
|         | 进给运动:   | —       | —                      | —                   |
|         | 车削      | 至5      | $10^{-4} \sim 10^{-2}$ | —                   |
|         | 刨削      |         | 0.13~1.3               | —                   |
|         | 锯       |         | 0.1~0.5                | —                   |

表 1-2 前三步运行时间和行程的计算

| 步 | 加加速度             | 时间间隔                                                             | 初 值                                                                     | 终 值                                                                                                                                                                                                                                         |
|---|------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | $r = +1.5 m/s^2$ | $\Delta t_1 = \frac{a_{max}}{r} = \frac{2}{3} s$                 | $a_{1a} = 0$<br>$v_{1a} = 0$<br>$S_{1a} = 0$                            | $a_{1e} = r \Delta t_1 = 1 m/s^2$<br>$v_{1e} = \frac{r}{2} \Delta t_1^2 = \frac{1}{3} m/s$<br>$S_{1e} = \frac{r}{6} \Delta t_1^3 = \frac{2}{27} m$                                                                                          |
| 2 | $r = 0$          | $\Delta t_2 = \frac{v_{max} - 2v_{1e}}{a_{max}} = \frac{4}{3} s$ | $a_{2a} = a_{2max} = 1 m/s^2$<br>$v_{2a} = v_{1e}$<br>$S_{2a} = S_{1e}$ | $a_{2e} = a_{max} = 1 m/s^2$<br>$v_{2e} = a_{max} \Delta t_2 + v_{1e} = \frac{5}{2} m/s$<br>$S_{2e} = \frac{a_{max}}{2} \Delta t_2^2 + v_{1e} \Delta t_2 + S_{1e}$<br>$= 1 \frac{11}{27} m$                                                 |
| 3 | $r = -1.5 m/s^2$ | $\Delta t_3 = \frac{a_{max}}{r} = \frac{2}{3} s$                 | $a_{3a} = 1 m/s^2$<br>$v_{3a} = v_{2e}$<br>$S_{3a} = S_{2e}$            | $a_{3e} = r \Delta t_3 + a_{2e} = 0$<br>$v_{3e} = \frac{r}{2} \Delta t_3^2 + a_{2e} \Delta t_3 + v_{2e} = 2 m/s$<br>$S_{3e} = \frac{r}{6} \Delta t_3^3 + \frac{a_{2e}}{2} \Delta t_3^2 + v_{2e} \Delta t_3$<br>$+ S_{2e} = 2 \frac{2}{3} m$ |