



中华人民共和国国家标准

GB/T 26921—202×
代替 GB/T 26921-2011

电机系统（风机、泵、空气压缩机） 优化设计指南

The guide of design optimization for motor systems
(fans, pumps, air compressors)

（征求意见稿）

202×-××-××发布

202×-××-××实施

中华人民共和国国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 录

前 言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件.....	2
3 术语和定义	3
4 电机系统的基本要求.....	3
4.1 对供电电源质量的要求.....	3
4.2 对电动机及变频器效率的基本要求.....	3
4.3 对电机系统功率因数的要求.....	3
4.4 对电机系统谐波限制要求.....	4
4.5 对电机系统计量器具配备的要求.....	5
5 电动机选用	5
5.1 电动机选用的基本原则.....	5
5.2 不调速运行电动机的选用.....	6
5.3 调速运行电动机的选用.....	7
6 电动机调速方式和调速装置的选择.....	7
6.1 电动机调速的基本要求.....	7
6.2 电动机调速方式及其控制方法的选择.....	7
6.3 调速装置的选择.....	9
7 风机系统优化设计.....	9
7.1 基本要求	10
7.2 管网设计	10
7.3 风机的选型.....	11
7.4 风机与电机匹配.....	12
7.5 风机系统优化设计的评价.....	12
8 泵系统优化设计.....	12
8.1 基本要求	12
8.2 泵机组运行方式及泵设计流量.....	13

8.3 泵系统管道布置与管网设计.....	13
8.4 泵选型	14
8.5 泵机组电动机的功率匹配及运行.....	15
8.6 泵系统优化设计的评价.....	15
9 空气压缩机系统优化设计.....	15
9.1 基本要求	15
9.2 压缩空气系统设计流量的确定.....	16
9.3 空气压缩机选型.....	17
9.4 压缩空气后处理装置.....	17
9.5 储气罐	17
9.6 压缩空气站布置.....	17
9.7 压缩空气管道.....	18
9.8 其他问题	18
9.9 空气压缩机系统优化设计的评价.....	18
附录 A（资料性附录）电动机主要类型与特性	19
附录 B（资料性附录）电动机的调速方式.....	26
附录 C（资料性附录）电机系统设计的技术经济比较.....	57
附录 D（资料性附录）风机的类型与特性.....	59
附录 E（资料性附录）泵的主要类型与特性.....	69
附录 F（资料性附录）空压机的特性及相关设备.....	78

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 26921-2011《电机系统（风机、泵、空气压缩机）优化设计指南》，与 GB/T 26921-2011 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 增加了规范性引用文件；
- 增加了部分术语和定义；
- 增加并调整了测量仪器的要求；

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国能源基础与管理标准化技术委员会（SAC/TC 20）提出并归口。

本文件起草单位： 。

本文件主要起草人： 。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 2011 年首次发布为 GB/T 26921-2011，本次为首次修订。

电机系统（风机、泵、空气压缩机）优化设计指南

1 范围

本标准规定了电机系统设计的基本要求，电动机选型，电动机调速方式和调速装置的选择，以及风机系统、泵系统、空气压缩机系统的优化设计和评价。

本标准适用于电机系统（风机、泵、空气压缩机）的节能优化设计和评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 755 旋转电机 定额和性能

GB 4943 信息技术设备的安全

GB 10068 轴中心高为 56 mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值

GB/T 10069.3 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声限值

GB/T 12497 三相异步电动机经济运行

GB/T 12668.2 调速电气传动系统 第 2 部分：一般要求 低压交流变频电气传动系统额定值的规定

GB/T 12668.3 调速电气传动系统 第 3 部分：产品的电磁兼容性标准及其特定的试验方法

GB/T 12668.4 调速电气传动系统 第 4 部分：一般要求 交流电压 1000 V 以上但不超过 35 kV 的交流调速电气传动系统额定值的规定

GB/T 13277 一般用压缩空气质量等级

GB/T 13466 交流电气传动风机（泵类、空气压缩机）系统经济运行通则

GB/T 13957 大型三相异步电动机基本系列技术条件

GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波

GB 14711 中小型旋转电机安全通用要求

GB 15703 隔爆型电机基本技术要求

GB/T 16665 空气压缩机组和供气系统节能监测方法

GB 18613 中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级

GB 19153 容积式空气压缩机能效限定值及能效等级

GB 19761 通风机能效限定值及能效等级

GB 19762 清水离心泵能效限定值及节能评价

GB 20052 三相配电变压器能效限定值及节能评价

GB/T 21056 风机、泵类负载变频调速节电传动系统及其应用技术条件

GB/T 21210 单速三相笼型感应电动机起动性能

GB 21518 交流接触器能效限定值及能效等级

GB 50029 压缩空气站设计规范

GB 50055 通用用电设备配电设计规范
JB/T 2224 大型交流三相四极同步电动机技术条件
DL/T 994 火电厂风机水泵用高压变频器

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 电机系统 motor systems

控制装置、电动机及其拖动的负载机械和管网等设备组成的系统。

3.2 N 设计电动机 design N motor

设计为正常起动转矩的三相笼型感应电动机。电动机采用直接起动，具有 2 极, 4 极, 6 极或 8 极，额定功率从 0.4 kW~1600 kW。

4 电机系统的基本要求

4.1 对供电电源质量的要求

4.1.1 电源电压与额定电压的偏差范围为：-5%~5%。

4.1.2 三相电压系统负序分量不超过正序分量的 1%（长期运行），或不超过 1.5%（不超过几分钟的短时运行），且零序分量不超过正序分量的 1%。

4.1.3 电源频率偏差不超过额定频率的±1%。

4.1.4 供电电压谐波电压因数（HVF），对单相和三相电动机，包括同步电动机但不包括 N 设计电动机应不超过 0.02；对 N 设计电动机应不超过 0.03。

4.2 对电动机及变频器效率的基本要求

4.2.1 对三相电动机效率的要求

4.2.1.1 对于低压中小型三相异步电动机，其效率值应符合 GB 18613 的规定。

4.2.1.2 对于高压三相异步电动机，其效率值应符合相关标准的规定。

4.2.1.3 对于一般用途的大型笼型三相异步电动机和大型绕线型三相异步电动机，其效率值应符合 GB/T 13957 的规定。

4.2.1.4 对于一般用途的大型三相四极同步电动机，其效率值应符合 JB/T 2224 的规定。

4.2.2 对变频器效率的要求

变频器在额定输出电压、额定输出电流的条件下，低压变频器效率应不低于 95%，高压变频器效率应不低于 96%。

4.2.3 对电机系统所用配电设备效率的要求

4.2.3.1 对于所配用的专用变压器，其空载损耗和负载损耗应符合 GB 20052 的规定。

4.2.3.2 对于所配用的交流接触器，其吸持功率应符合 GB 21518 的规定。

4.3 对电机系统功率因数的要求

应根据电机系统运行方式合理实施功率因数补偿，补偿后设计工况下功率因数应不低于 0.9。

4.4 对电机系统谐波限制要求

4.4.1 对谐波电压的要求

电机系统接入公用电网后，电网谐波电压应不大于表 1 的规定。

表 1 谐波电压限值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 THD _v (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			

4.4.2 对谐波电流的要求

4.4.2.1 对于准备接入到低压配电系统的每相输入电流不大于 16 A 的电机系统，其产生的输入电流的各次谐波不大于表 2 的规定。

表 2 每相输入电流不大于 16 A 设备的谐波电流限值

	谐波次数 n	最大允许谐波电流 A
奇次谐波	3	2.30
	5	1.14
	7	0.77
	9	0.40
	11	0.33
	13	0.21
	$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times 15/n$
偶次谐波	2	1.08
	4	0.43
	6	0.30
	$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times 8/n$

4.4.2.2 对于准备接入到低压配电系统的每相输入电流大于 16 A 的电机系统，其产生的输入电流的各次谐波应不大于表 3 的规定。

表 3 每相输入电流大于 16 A 设备的谐波电流限值

谐波次数 n	允许的谐波电流 I_n/I_1 (%)	谐波次数 n	允许的谐波电流 I_n/I_1 (%)
3	21.6	21	≤ 0.6
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	≤ 0.6
11	3.1	29	0.7

表 3 每相输入电流大于 16 A 设备的谐波电流限值（续）

谐波次数 n	允许的谐波电流 I_n/I_1 (%)	谐波次数 n	允许的谐波电流 I_n/I_1 (%)
13	2.0	31	0.7
15	0.7	≥ 33	≤ 0.6
17	1.2		
19	1.1	偶次	$\leq 8/n$ 或 ≤ 0.6
注： I_n 为谐波电流分量， I_1 为基波电流额定值。			

4.4.2.3 对于准备接入到高压配电系统的电机系统，其产生的输入电流的各次谐波应不大于表 4 的规定。

表 4 高压电机系统谐波电流限值

谐波次数	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD _I
允许谐波电流 I_n/I_1 (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
注 1： I_n 为谐波电流分量， I_1 为基波电流额定值。 注 2：上表为奇次谐波限值，偶次谐波限值为上述奇次谐波含量的 25%。 注 3：应在装置正常运行时（持续至少 1 h）进行谐波电流测量，按 95%概率大值选取测量值，作为判断是否超过允许值的依据。在较短周期内，启动过程中或非正常工作条件下，可允许超过上述限值的 50%。						

4.4.2.4 对于准备接入到电网公共连接点的电机系统，其注入的谐波电流分量应符合 GB/T 14549 的规定。

4.5 对电机系统计量器具配备的要求

4.5.1 对于功率在 55 kW 及其以上的电动机，应监视其电压、电流、功率因数及有功功率，并配备有功电能表。仪表的准确度应不低于表 5 的规定。

表 5 仪表的准确度等级

表计类型	电压表	电流表	功率因数表	有功电能表
准确度等级	1.5	1.5	1.5	2.0

4.5.2 在风机、泵、空气压缩机系统的相关部位处应安装必要的压力表和流量表。压力表与流量表准确度应不低于表 6 的规定。

表 6 压力表与流量表准确度

表计类型	压力表	流量表
准确度等级	2.0	2.5

5 电动机选用

5.1 电动机选用的基本原则

5.1.1 在满足机械负载要求的前提下，经济合理地确定电动机的类型和额定功率，所选电

动机应与被拖动机械负载的特性相匹配。电动机的主要类型与特性见附录 A。

5.1.2 电动机的额定电压应根据其额定功率和所在系统的配电电压或供电电源的输出电压选定；必要时，应通过技术经济比较确定。

5.1.3 根据工作场所的环境条件，选择相应的防爆型式、外壳防护等级和绝缘等级的电动机。

5.1.4 电动机的一般性能、安全性能、防爆性能以及噪声和振动要求应符合 GB 755、GB 14711、GB 15703、GB/T 10069.3 和 GB 10068 等相关标准。

5.1.5 电动机与被拖动机械负载的转轴宜采用联轴器直接连接。

5.1.6 电动机的起动方式应符合 GB 50055 的规定。大功率、高电压三相同步电动机宜采用无换向器同步电动机方式进行起动。

5.1.7 电动机的堵转转矩、最大转矩、最小转矩、转速及其调节范围等，应满足电动机所拖动的负载在各种运行方式下的要求。

5.1.8 在有频繁起动、高起动转矩和冲击负载等特殊要求时，可选用相应的专用电动机并进行转矩校验。

5.1.9 对于有规律变化的机械负载，应根据其工作制和定额，按 GB 755 选择相应的工作制类型与定额类别的电动机。

5.1.10 对于需要调速的机械负载，宜根据调速范围、效率及长期经济效益等因素，选择适合于调速方式的电动机。

5.1.11 年运行时间大于 3000 h，负载率大于 60% 的低压中小型三相异步电动机，其效率值应符合 GB 18613 节能评价的规定。

5.2 不调速运行电动机的选用

5.2.1 电动机类型的选择

5.2.1.1 对于中小容量的机械负载，当起动、制动比较频繁，要求起动、制动转矩较大时，应选用堵转转矩大、堵转电流较小的笼型三相异步电动机；在堵转转矩不能满足要求时，可选用高转差式三相异步电动机或绕线型三相异步电动机。

5.2.1.2 对于拖动风机、泵、压缩机的高压大功率电动机，当在技术经济上合理时，宜选用三相同步电动机。

5.2.2 电动机额定功率的选择

5.2.2.1 选择额定功率时，应使电动机的平均负载率不低于 60%。电动机的平均负载率低于 50% 时，在改建和扩建设计中应更换成较小额定功率的电动机。

5.2.2.2 电动机额定功率大于 250 kW 时，宜优先选用高压三相交流电动机。

5.2.2.3 对于负载稳定、连续运转的电动机，应使其长期运行在 75% 负载率，此时按 GB/T 12497 计算的综合效率最高。

5.2.2.4 对于变工况连续工作的电动机，应根据负载变化情况求出平均等效功率，电动机的额定功率应大于等效功率，并对电动机的起动性能和过载能力进行校核。

5.2.2.5 对于短时或断续工作的电动机，宜选用相应的工作制，并使电动机额定功率略大

于负载的功率。也可选用连续工作制电动机来替代，此时，应采用等效法求出工作时间内的等效功率，电动机的额定功率应略大于等效功率，并应对电动机的起动和过载能力进行校核。

5.2.3 对于负载经常变化的电动机，可采用调压等节电装置，实现经济运行。

5.3 调速运行电动机的选用

5.3.1 电动机类型的选择

5.3.1.1 电动机的结构和性能应适合于变速运行要求。

5.3.1.2 在采用变频调速装置进行调速时，应选择适合于变频调速装置供电的电动机。

5.3.1.3 在采用内反馈串级调速装置进行调速时，应采用定子有两套绕组的绕线型三相异步电动机。

5.3.1.4 机械负载只要求有两种或三种转速时，可采用变极双速或三速三相异步电动机，使其在各转速下满足负载要求。

5.3.2 电动机额定功率的选择

5.3.2.1 对风机机组、泵机组起动、制动和过载能力没有特殊要求时，电动机的额定功率选择按下列公式计算：

$$P_m = \frac{P_p(1 + \alpha)}{\eta_t} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

P_m —— 电动机功率，单位为千瓦（kW）；

P_p —— 额定流量下的轴功率，单位为千瓦（kW）；

η_t —— 传动效率；

α —— 余量。

55 kW 以下 $\alpha = 0.1 \sim 0.2$

55 kW~250 kW $\alpha = 0.05 \sim 0.15$

250 kW 以上 $\alpha = 0.02 \sim 0.05$

5.3.2.2 对于要求频繁起动、制动，或者要求有瞬间过载能力的负载，应在满足最大转矩和起动转矩要求的前提下，选择电动机的额定功率。应使电动机的额定功率大于负载轴功率。

6 电动机调速方式和调速装置的选择

6.1 电动机调速的基本要求

电机系统进行调速设计或改造时，应根据负载的类型和特性、调速范围、起动转矩、年负荷曲线等要求，考虑寿命周期成本，根据寿命周期成本分析，做出不同方案的技术经济分析比较，选择寿命周期成本最低的方案。电动机的调速方式，见附录 B。寿命周期成本分析，见附录 C。

6.2 电动机调速方式及其控制方法的选择

6.2.1 变频调速

6.2.1.1 风机、泵适用变频调速的条件

6.2.1.1.1 风机、泵的运行工况点偏离高效区，通过调速可使运行工况点处于高效区。

6.2.1.1.2 压力、流量变化幅度较大，运行时间长的系统。

6.2.1.1.3 中、低流量变化类型的风机、泵负载及全流量间歇类型的风机、泵负载运行工况在满足压力时，应符合下列要求：

——流量变化幅度 $\geq 30\%$ 、变化工况时间率 $\geq 40\%$ 、年运行时间 ≥ 3000 h；

——流量变化幅度 $\geq 20\%$ 、变化工况时间率 $\geq 30\%$ 、年运行时间 ≥ 4000 h；

——流量变化幅度 $\geq 10\%$ 、变化工况时间率 $\geq 30\%$ 、年运行时间 ≥ 5000 h。

6.2.1.2 对于长时间处于变负载运行的螺杆式空气压缩机，宜采用变频调速。

6.2.1.3 变频器选型的原则

6.2.1.3.1 对于额定电压为 380V、660 V 三相异步电动机，应采用低压“交直交”电压源变频器。

6.2.1.3.2 对于额定电压为 1140V 或 3000V（以及非标电压 1000V~3000 V）三相异步电动机，宜采用二极管钳位式三电平变频器。

6.2.1.3.3 对于额定电压为 6 kV、10 kV 三相异步电动机，宜采用串联 H 桥高压变频器。

6.2.1.3.4 对于额定电压为 6 kV、10 kV 三相同步电动机，宜采用电流型晶闸管逆变器。

6.2.1.3.5 对于用在高温、高海拔场合，应采用特殊设计的变频器。

6.2.1.4 变频器与电动机匹配的要求

6.2.1.4.1 变频器额定输出电压与电动机额定电压相符。

6.2.1.4.2 变频器额定输出电流应大于电动机实际运行最大电流。拖动离心风机、离心泵的普通电动机，变频器输出额定电流应与电动机额定电流相符。对于其他负载，如深水泵，则应根据负载特性确定其最大电流和过载能力。

6.2.1.4.3 机械负载要求有较大的起动转矩和加速转矩时，宜采用矢量控制方式或直接转矩控制。

6.2.1.4.4 变频器与电动机之间安装距离较远时，应适当增大变频器容量或在变频器输出端加装电抗器。

6.2.1.5 对变频器的要求

6.2.1.5.1 变频器输出电压、频率连续可调。

6.2.1.5.2 变频器一般性能应符合 GB/T 12668.2 和 GB/T 12668.4 的要求。

6.2.1.5.3 对于低压变频器，应符合 GB/T 21056 的规定。

6.2.1.5.4 对于电力行业所用高压变频器，应符合 DL/T 994 的规定，其他行业可参考执行。

6.2.1.5.5 变频器的过载能力应大于额定电流的 20%，并持续 60 s。

6.2.1.5.6 变频器应具有各种保护功能，如输入过压、欠压保护，缺相保护，过流保护，短路保护，防雷电冲击保护等。接地应符合 GB 4943 的要求。

6.2.1.5.7 高压大容量变频调速系统应采取限制产生轴电流的措施。

6.2.1.5.8 变频器的电磁兼容性能应符合 GB/T 12668.3 的规定。

6.2.1.5.9 变频器产生的谐波应符合本标准 4.4 条的规定。

6.2.1.6 变频调速控制方式

6.2.1.6.1 变电压变频率控制

在一般工况下,可采用变电压变频率控制,利用脉宽调制技术改变变频器输出电压和频率。采用不同的压频比提升电动机的输出转矩,满足起动的要求。

6.2.1.6.2 矢量控制

当负载为短时工作制,且要求快速起动,宜采用矢量控制方式。

6.2.1.6.3 直接转矩控制

当负载为短时工作制,要求快速起动,也可采用直接转矩控制。

6.2.2 变极调速

6.2.2.1 在满足风机、泵负载运行工况非频繁变化时,可采用多速三相笼型异步电动机。

6.2.2.2 变极电动机宜采用全压起动。

6.2.3 绕线型三相异步电动机串级调速

6.2.3.1 对于额定电压为 6 kV、10 kV,功率较大的场合,可选用串级调速方式。

6.2.3.2 绕线型三相异步电动机应选用适当的起动设备。

6.2.4 开关磁阻调速

对于低压 380 V、660 V 供电的风机、泵负载,可采用开关磁阻电动机调速。

6.2.5 其他调速方式

其他调速方式应通过技术经济分析比较后选用。

6.3 调速装置的选择

6.3.1 调速装置容量选择

6.3.1.1 低压变频器装置容量选择见附录 B.1.5.1。

6.3.1.2 用于高压三相异步电动机的串联 H 桥高压变频器,其额定容量的选择,宜为电动机额定功率的 1.25 倍。

6.3.1.3 采用电流型晶闸管逆变器调速方式起动的高压大容量同步电动机,调速装置的额定容量不宜超过电动机额定功率的 25%。

6.3.1.4 用于抽水蓄能同步电动机机组变频起动的调速装置,其额定容量不宜超过电动机额定功率的 10%。

6.3.2 调速装置的安装空间和环境要求

6.3.2.1 应根据装置的发热量进行散热系统设计,采取合理的散热方式(如通风、空调、水冷却器、热管等),应符合 GB/T 12668.2 和 GB/T 12668.4 中的有关规定。

6.3.2.2 当运行环境存在潮湿、粉尘、腐蚀性气体以及酸碱度等异常使用条件,应在系统设计时采取相应防护措施。

7 风机系统优化设计

7.1 基本要求

7.1.1 风机系统应满足所需要的最大风量及对应的风压和最高风压及对应的风量的工况要求。

7.1.2 离心式通风机和轴流式通风机，其风机效率应符合 GB 19761 的能效限定值，宜选用符合 GB 19761 的节能评价值以上的通风机。

7.1.3 在起动、停机及变工况调速运行时，不应发生喘振。

7.1.4 风机系统设计选型时，应综合考虑压力、流量、管网特性、负载性质、工作制、起动与制动、年运行小时等。尽量使风机与管网阻力特性相匹配，在满足压力、流量要求前提下，使风机运行在经济运行区内。风机的类型与特性见附录 D。

7.1.5 对于变工况运行而不调速的风机系统，应选择合理的调节设备或运行方式，实现风机系统运行的优化。

7.1.6 电动机与风机传动应满足强度和稳定可靠的要求。在多种传动方式中，宜采用直联传动。

7.2 管网设计

7.2.1 风机系统中的管网设计应在优化生产工艺的条件下，确定合理的配置方案和输送半径。根据生产工艺要求，合理确定管网的材料和尺寸，以达到经济流速的要求，经济流速见表 7。

表 7 通风机管道内经济流速

类 型				风速 m/s
风机	进口			7~15
	出口			10~30
通风管道	低速管道	主管道	民用	3.5~4.5
			工业用	6~9
		分管道	民用	3
			工业用	4~5
		上升分管道	民用	2.5
			工业用	4
		大气进气口		
	高速管道	主管道		20~30
风力输送	谷物			15~30
	煤粉			20~40
	水泥			20~40
	氧化铝			30~40
	砂			30~45
	橡胶粉末			15

	纱屑	7.5
--	----	-----

表 7 通风机管道内经济流速（续）

类 型		风速 m/s
风力输送	金属屑	18
	锯末	15

7.2.2 合理布置管网，支管宜从主管的上面或侧面连接，尽量减少 90°弯管、阀门、接头及流通截面突变的管件，降低其阻力系数。

7.2.3 合理布置风机进出口管道。进口前及出口后各有一段直管段，其长度应不小于 2.5 倍进出口管道当量直径。

7.2.4 对高速气流的管网，转弯处应采用曲率半径大的弯管，分流与汇流时应采用 30°的 Y 形分支管。对中速或低速气流的管网，分流与汇流时应采用 45°或 30°的 Y 形分支管。

7.2.5 管网负载应保持平衡，送、排风系统各并联环路压力损失的差额应不大于 10%。当通过调整管道断面仍无法达到要求时，宜安装调节装置。

7.2.6 选用先进的密封技术，减少风管泄漏率，一般送、排风系统风管泄漏率控制在 10% 以内，对于特殊场合应符合特殊规定的要求。

7.2.7 为减少肘管、弯管、弓形管路中流动损失，可加装导流叶片，使流速沿截面的分布均匀，减少阻力。

7.3 风机的选型

7.3.1 选型原则

7.3.1.1 风机应满足风机系统的流量和风压的要求。

7.3.1.2 风机应合理选择风机类型、规格、调节方式和调节附件。

7.3.1.3 风机应满足输送介质和工作环境的要求。

7.3.1.4 风机长期运行的工况点应在风机的经济运行区内。

7.3.2 选型步骤

7.3.2.1 根据设计要求（控制区域、温度、湿度等）确定流量。

7.3.2.2 根据管网设计的计算结果确定风压。

7.3.2.3 根据风压、流量和运行要求选择风机型号。风机主要有离心式风机和轴流式风机，两类风机的特性见附录 D。

7.3.2.4 根据负载特性确定风机的调节方式和调节设备。

7.3.2.4.1 风机运行中，流量基本保持接近于设计值，可采用进口节流调节进行微调。

7.3.2.4.2 离心风机可安装进口导流器，轴流风机可采用调节动、静叶安装角，进行工况调节。

7.3.2.4.3 风机运行中，低流量运行时间长或间歇变工况运行时，宜采用变速运行。

7.3.2.4.4 当流量变化幅度大于 20%，年运行时间大于 4000 h 时，风机应采用调速运行，不宜采用旁路、挡板或阀门调节。

7.3.3 风机台数与运行方式

7.3.3.1 若单台风机无法满足压力或流量要求，可选多台风机串联或并联工作。一般情况下，宜选用相同型号和规格的风机。

7.3.3.2 压力、流量变化的串联风机，可采用调速运行。

7.3.3.3 对多台并联风机可采用投切台数适应变工况运行。

7.4 风机与电机匹配

7.4.1 选定风机的效率曲线和负载特性应与电动机效率曲线相匹配。

7.4.2 风机需要变速运行时，宜采用风机、泵专用变极多速三相异步电动机。

7.4.3 电动机的防护等级、绝缘等级应与风机输送介质、工作环境等相适应。

7.5 风机系统优化设计的评价

风机系统平均输送每千吨气体的能耗（ e_w ）作为风机系统优化评价指标，对于风机系统的 e_w 应小于 0.25。 e_w 按下列公式计算：

$$e_w = \frac{\sum_{i=1}^n E}{0.36\rho g \sum_{i=1}^n q_v P t} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

e_w —— 输送每千吨气体能耗，单位为千瓦·时每千吨（kW·h/kt）；

E —— 风机每时段的耗能值，单位为千瓦·时（kW·h）；

ρ —— 输送气体出口密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

g —— 重力加速度，单位为米每秒平方（m/s²）；

q_v —— 风机某时段内排出气量，单位为立方米每秒（m³/s）；

P —— 相应时段内风机出口平均压力，单位为帕（Pa）；

t —— 每时段的排气时间（h）；

n —— 时间段数量。

8 泵系统优化设计

8.1 基本要求

8.1.1 设备总装机合理、泵额定效率应符合 GB 19762 的能效限定值，宜选用符合 GB 19762 节能评价值以上的泵。

8.1.2 管道系统运行时，在经济合理的条件下，泵总输送液体能量损失最小。

8.1.3 泵、电动机之间的传动应满足转速、强度和稳定可靠的要求。

8.1.4 变速运行时按泵起动、停机和运行的需要，及时调整转速以达到安全、可靠运行。

系统效率应符合 GB/T 13466 的要求。

8.1.5 泵系统设计选型时，应综合考虑扬程、流量、管网特性、负载性质、工作制、启动与制动、年运行小时等。尽量使泵与管网阻力特性相匹配，在满足扬程、流量要求前提下，使泵运行在经济运行区内。

8.1.6 对于变工况运行而不调速的泵系统，应选择合理的调节设备或运行方式，实现泵系统运行的优化。

8.2 泵机组运行方式及泵设计流量

8.2.1 设计的泵机组群，在满足不同时段流量需求时，泵系统运行的效率应符合 GB/T 13466 的规定。

8.2.2 应根据所供应区域需求总量计算泵系统总流量，其总管道最大流量不应超过总流量的 50%，见附录 E.2。

8.2.3 泵的型号与规格应按供液流量曲线选用两种以上规格泵，以保证小流量供液时泵的效率。

8.2.4 应结合泵的型号与规格选择泵机组群的台数，在保证供液需求的情况下，使每台泵的运行效率高于其额定效率的 80%。

8.3 泵系统管道布置与管网设计

8.3.1 管道布置

8.3.1.1 输出管

8.3.1.1.1 在泵系统范围内，从泵出口至管道最远端，应尽量缩短管线，避免过多弯折。弯管曲率半径不小于管径的 1.25 倍。

8.3.1.1.2 在管网中，管道线上不应有通流截面的突扩、突缩等管路附件。渐扩渐缩管的扩散、收缩角不应大于 12° 。

8.3.1.1.3 应尽量减少管接头、弯头、三通、阀门等管件，减小管道的局部阻力损失。

8.3.1.1.4 在易产生空气滞留的输出管断面变化处，应设排气阀，防止产生气囊阻塞。

8.3.1.2 吸入管

8.3.1.2.1 从吸水面至泵进口，应尽量缩短长度。吸入管断面不应有突扩、突缩，尽量不安装底阀和各种闸阀，并减少其他管路附件。

8.3.1.2.2 泵吸入管的吸入口，应保持一定淹没深度，防止进气产生漩涡。

8.3.1.2.3 从泵吸入口至吸入管弯头处，水平吸入管应有向弯头处向下倾斜，其倾斜度不小于 0.5%，吸入管长度大于 3 米时，倾斜度不小于 1%。

8.3.1.2.4 在吸入管中水平段有渐缩接头时，应采用偏心接管，偏心朝下，其收缩角不宜大于 12° 。

8.3.1.2.5 吸入管内阻力损失应满足有效汽蚀余量要求。见附录 E.5。

8.3.2 管道材料

应根据输送液体的性质、温度、扬程、速度及生产的工艺条件选择管材，管内壁应光

滑平整，表面粗糙度不大于 $12.5\ \mu\text{m}$ 。

8.3.3 管径和流速

输液管的管径应根据输液管中的沿程损失和流速作优化计算经济流速。

钢管中输送不同介质的经济流速见表 8。

表 8 不同介质的经济流速

类型	流速
10 米以内的短输水管和吸入管	3.5m/s 以下，一般为 2m/s~3m/s
长输水压力管	小口径（300mm 直径以下），1m/s~2m/s
	大口径（300mm 直径以上）1.5m/s~3m/s
机油和燃油管	0.2m/s~1.2m/s
汽油或其他燃油管	1m/s~3m/s

输液中沿程损失计算公式见附录 E.2。

8.3.4 管路附件及局部阻力损失

8.3.4.1 管网中的管路附件（弯头、三通、分流口、阀门等）要求流道内表面光滑平顺，其表面粗糙度不大于 $12.5\ \mu\text{m}$ ，流道中不应有引起流束产生突变的表面。

8.3.4.2 管路附件的局部阻力损失计算见附录 E.2。

8.4 泵的选型

8.4.1 选型原则

8.4.1.1 泵应满足泵系统的流量和扬程的要求。

8.4.1.2 泵应合理选择泵类型、规格和附件。

8.4.1.3 泵应满足输送介质和工作环境的要求。

8.4.1.4 泵长期运行的工况点应在泵的经济运行区内。

8.4.1.5 泵的类型应根据工艺设备对流体要求和流体负荷变化特点，经过技术经济比较后确定。一般类型泵工作原理和控制方式见附录 E.1。

8.4.1 泵转速和汽蚀要求

8.4.1.1 在泵的零部件和机械强度允许情况下，应满足所选泵的汽蚀要求，尽量提高泵的额定转速。

8.4.1.2 应避免泵运行中发生汽蚀。要求泵吸入口的有效汽蚀余量，大于泵生产厂家提供的必须汽蚀余量。

8.4.2 选型步骤

8.4.2.1 按供、排液要求，或按设计要求的供、排液图表，布置管网。

8.4.2.2 按管网要求，计算干、支系统各段经济流速，选择各段管径。

8.4.2.3 按管网和供、排液流量方案计算泵扬程。

8.4.2.4 按管网供、排液要求和供、排液图表确定泵的台数、运行方案。

8.4.2.5 按供、排液要求的泵流量和计算的泵扬程初步选择几种泵转速和泵型号方案。

- 8.4.2.6 在初选泵的性能曲线上，绘出不同工况的系统性能曲线，求出工作点的变化。
- 8.4.2.7 每种泵工况变化时，曲线上每工况点的效率不应低于泵额定效率的 80%。
- 8.4.2.8 根据附录 C，进行技术经济比较，选择优化方案。
- 8.4.2.9 最后选择泵结构型式，泵结构型式的选择不影响泵效率，其效率变化不超过±10%。

8.5 泵机组电动机的功率匹配及运行

8.5.1 泵与电动机的匹配

- 8.5.1.1 选定泵的效率曲线和负载特性应与电动机效率曲线相匹配。
- 8.5.1.2 电动机的防护等级、绝缘等级应与泵输送介质、工作环境等相适应。

8.5.2 泵的运行

- 8.5.2.1 泵系统正常运行时，泵的运行效率应不低于其额定效率的 80%。
- 8.5.2.2 泵系统中若需要双泵或多泵并联运行时，每台泵的运行效率应不低于其额定效率的 80%。

8.6 泵系统优化设计的评价

泵系统平均输送每千吨米液体的能耗（ e_b ）作为泵系统优化评价指标，对于泵系统的 e_b 应小于 0.28。 e_b 按下列公式计算：

$$e_b = \frac{1000E}{3.6\rho g \Sigma QHt} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- e_b ——千吨米液体能耗，单位为千瓦·时每千吨米（kW·h/ktm）；
- E ——泵系统耗能值，单位为千瓦·时（kW·h）；
- ρ ——液体的密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
- g ——重力加速度，单位为米每秒平方（m/s²）；
- Q ——某时段内泵系统提供的平均流量，单位为立方米每秒（m³/s）；
- H ——同一时段内泵系统的平均扬程，单位为米（m）；
- t ——时段提液时间，单位为时（h）。

9 空气压缩机系统优化设计

9.1 基本要求

- 9.1.1 装有活塞式空气压缩机或离心式空气压缩机，或者单机额定排气量大于或等于 20 m³/min 的压缩空气站宜为独立建筑，且与有噪声、震动防护要求场所的间距应符合现行的有关规定。
- 9.1.2 对于容积式空气压缩机，应符合 GB 19153 规定的能效限定值，宜选用符合节能评价

值的空气压缩机。

9.1.3 空气压缩机、后处理装置、储气罐本体安全阀以及各设备之间相关安全措施的配置应符合 GB 50029 和其他相关标准。

9.1.4 压缩空气站应设置废油收集装置，废水排放应符合相关标准和规范。

9.2 压缩空气系统设计流量的确定

9.2.1 压缩空气系统设计流量，由每个用气设备的需求流量汇总的表 9 确定。

表 9 压缩空气系统流量计算表

序号	用气设备 名称	压力需求 MPa	用气设备流量需求 m ³ /min			工作周期 s	
			最小值	平均值	最大值	运行	停止
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
合计							

9.2.2 压缩空气系统设计流量可依用能单位最大消耗量为基础计算，见公式（4）

$$Q = \sum Q_{\max} \cdot K(1 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中：

Q ——压缩空气系统设计流量，单位为立方米每分（m³/min）；

$\sum Q_{\max}$ ——压缩空气系统中用户最大流量需求总和，单位为立方米每分（m³/min）；

K ——同时使用系数，取 0.75~1 之间，用户较多时取较小值；

φ_1 ——管道系统漏损系数，取 0.1~0.15；

φ_2 ——干燥机自耗气系数，无热再生式干燥机取 0.12~0.15，微热再生式干燥机取 0.05~0.07，冷冻式干燥机及加热式再生干燥机取 0；

φ_3 ——设计未预见消耗系数，一般取 0.1。

当使用这种方法确定系统设计流量时，各系数的选择宜参照相似用户系统的流量变化特

点进行。

9.3 空气压缩机选型

9.3.1 空气压缩机的类型、台数和容量的选择，应根据工艺设备对压缩空气质量的要求和压缩空气流量要求的变化特点，经过经济比较后确定。当单台空气压缩机容量超过 $60 \text{ m}^3/\text{min}$ 时，宜采用离心式空气压缩机。常见类型的空气压缩机工作原理和控制方式见附录 F.1。

9.3.2 一个压缩空气站内，活塞式空气压缩机或螺杆式空气压缩机的数量宜为 3 台~6 台。对于同一品质和压力的供气系统，除非配置有变速传动空气压缩机外，其型号原则上不宜超过两种。离心式空气压缩机的台数宜为 2 台~5 台，并宜采用同一型号。

9.3.3 在确定系统基本负荷和变化负荷的基础上，选用空气压缩机时宜遵循如下原则：

a) 对于基本负荷，宜选用离心式空气压缩机或螺杆式空气压缩机。负荷较大时宜选用离心式空气压缩机。

b) 对于变化负荷，宜选用活塞式空气压缩机或选用带有变速传动的螺杆式空气压缩机。

c) 对于备用容量，宜综合考虑系统负荷变化范围和空气压缩机部分负荷特性，经过经济比较后确定。

9.3.4 当一个系统配置有多台不同容量的空气压缩机，系统负荷变化范围较大且频繁时，宜配置中央控制系统。

9.4 压缩空气后处理装置

9.4.1 干燥器和过滤器等压缩空气后处理装置的选择，应根据供气系统和用气设备对压缩空气质量和需处理的压缩空气量，在参照 GB/T 13277 的基础上进行经济比较后确定。常见压缩空气后处理设备类型参见附录 F.2。

9.4.2 在对满足同一空气质量的后处理装置进行选择时，应在寿命周期成本分析的基础上，首先选择节能型产品。

9.4.3 根据用气设备对压缩空气质量等级的要求，应在空气干燥装置前后和用气设备前配置相应精度的压缩空气过滤器。

9.4.4 对于不同区域具有不同压缩空气质量要求的系统，宜通过空气后处理装置的配置，根据空气质量需求进行分区域供气。

9.4.5 当用户要求干燥的压缩空气不能中断时，应配置备用压缩空气后处理装置。

9.5 储气罐

9.5.1 根据压缩空气负荷变化，在空气压缩机出口、压缩空气后处理装置之后和大负荷间歇性用气设备附近，宜配置足够容量的储气罐，其作用参见附录 F.3。

9.5.2 空气压缩机出口储气罐的容积大小，宜为空气压缩机额定排气量的 20%~25%。

9.5.3 压缩空气后处理装置之后的储气罐和大负荷间歇性用气设备附近的储气罐，其容量选择宜根据不同行业压缩空气负荷变化的特点来确定。同时，宜在储气罐后配置压力流量控制器，以稳定系统供气压力，降低系统供气负荷。

9.6 压缩空气站布置

9.6.1 压缩空气站在厂区内的布置可采用集中式站房或分散式站房两种方式，应综合考虑系统用气负荷在厂区内的分布情况、供电供水的合理性和未来生产规划等多种因素，经技术经济比较后确定。当采用分散式站房布置时，宜联网运行。当两个压缩空气系统的压力等级不同但接近时，应在连接管路上安装压力流量控制器。

9.6.2 压缩空气站避免靠近易燃易爆、腐蚀性、有毒有害气体以及粉尘等场所，并位于上述场所全年风向最大频率的上风侧。

9.6.3 压缩空气站的朝向，宜使机器间有良好的通风，并宜减少日晒。

9.6.4 空气压缩机的吸气口，宜装在室外，且与机组的连接管道力求短、直。

9.6.5 风冷螺杆式空气压缩机和离心式空气压缩机的冷却风宜排至室外。

9.7 压缩空气管道

9.7.1 压缩空气管道应满足用户对压缩空气流量、压力和品质的要求，并应考虑今后生产发展的需要。

9.7.2 压缩空气站中压缩空气流速不应大于 5 m/s；压缩空气站的主分配管路的压缩空气流速不应大于 10 m/s；主分配管路到用气点的压缩空气流速不应大于 15 m/s。从空气压缩机出口到用气点的压降小于空气压缩机排气压力的 10%。

9.7.3 主分配管路到用气点之间连接管路和空气处理部件尺寸，宜根据用气设备最大空气流量来选择。

9.7.4 管道和阀门等相关附件的选择，应遵循阻力系数低的原则。

9.8 其他问题

有关压缩空气系统设计的其他问题，包括土建、电气、热工测试仪表和保护装置、给排水和采暖通风等，参照 GB 50029 进行。

9.9 空气压缩机系统优化设计的评价

9.9.1 空压站系统总管供气压力波动范围不应超过 0.05 MPa。

9.9.2 从空气压缩机出口到用气点的压降应小于空气压缩机排气压力的 10%。

9.9.3 空气压缩机组用电单耗不应超过 GB/T 16665 中所规定的数值（表 10）。

表 10 空气压缩机组及供气系统用电单耗指标表

电动机容量 kW	用电单耗合格指标 kW · h/m ³
≤45	0.129
55~160	0.115
≥200	0.112
注：电动机容量不在列表数据范围内时，合格指标用内插法确定。	

。

附录 A

(资料性附录)

电动机主要类型与特性

A.1 电动机的主要类型

按照电源种类及结构特点,电动机通常可分为直流电动机和交流电动机两大类,交流电动机又可分为同步电动机和异步电动机两类。

交流电动机按照相数可分为单相电动机和三相电动机等。各行业中应用的电动机绝大多数是三相交流电动机。不要求调速的大容量生产机械,如风机、空气压缩机等,多采用三相同步电动机。三相同步电动机可与电力电子变流器构成调速系统,应用于要求调速的生产机械。三相异步电动机可拖动多种生产机械,应用最广泛,是主要用电负荷。三相异步电动机有多种调速运行方式。电动机的调速方式见附录B。

A.2 同步电动机的特性

A.2.1 转速与频率的关系

同步电动机的转速 n_1 与供电电源频率 f 有严格的正比例关系,一台 p 对极同步电动机的转速为 $n_1=60 f/p$ 。 n_1 也称为同步转速。

电动机的极对数 p 为整数,因此,在电源频率 f 一定时,同步电动机转速 n_1 与极对数 p 有严格的对应关系。我国电力系统的频率规定为50 Hz,若 $p=1、2、3、4\dots$,则 $n_1=3000\text{ r/min}$ 、 1500 r/min 、 1000 r/min 、 750 r/min , ...。

A.2.2 机械特性

电动机的机械特性是电动机电磁转矩 T 与转速 n 的关系曲线。同步电动机稳态运行时,转速 n 等于同步转速 n_1 ;电源频率 f 不变时,转速 n 不随负载转矩的改变而变化。因此其机械特性是一条与转矩 T 坐标轴平行的直线,是硬特性。

在额定励磁电流下,同步电动机能产生最大转矩。负载转矩低于最大转矩时,电动机能以同步转速稳定运行。为保证运行稳定性,要求电动机的最大转矩与负载转矩相比足够大。最大转矩与额定电磁转矩的比值称为过载能力。通常要求同步电动机的过载能力为2~3.5。

同步电动机可在额定工况长期运行。正常运行时,负载转矩不应超过电动机额定电磁转矩,以免电动机过载。由电动机铭牌上的额定功率 P_N 和额定转速 n_N ,可近似求得额定电磁转矩,

$$T_N \approx 9550 P_N / n_N \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中:

T_N —— 额定电磁转矩的数值,单位为牛·米(N·m);

P_N —— 额定功率的数值,单位为千瓦(kW);

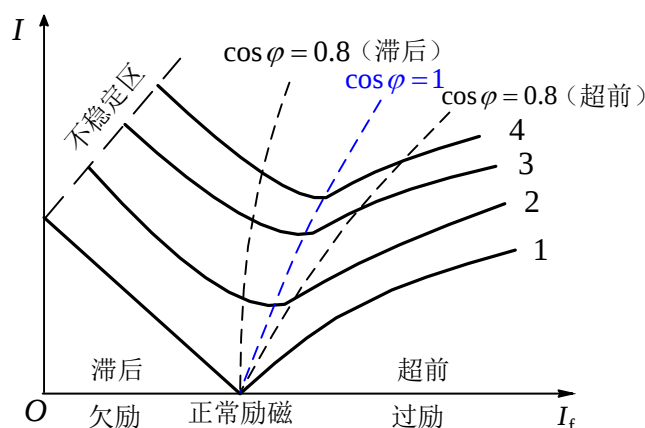
n_N —— 额定转速的数值,单位为转每分(r/min)。

A.2.3 V形曲线特性

V形曲线特性表示同步电动机在无功功率调节时定子（电枢）电流 I 与励磁电流 I_f 的关系。当负载转矩不变，即电动机输出功率不变时，改变励磁电流 I_f ，可改变电动机的无功功率，调节定子功率因数 $\cos\varphi$ 的大小及其性质；同时，定子电流 I 的大小会随之改变，如图A.1中曲线1所示。该曲线形状像英文字母“V”，故称V形曲线。在不同的负载转矩或输出功率下，有不同的V形曲线。图A.1中，曲线1、2、3、4对应的电动机输出功率依次增大。

每条V形曲线上都有功率因数 $\cos\varphi=1$ 的点，如图A.1所示。电动机运行于该点时，无功功率为零，定子电流 I 最小，此时的励磁电流称为正常励磁电流。励磁电流 I_f 不等于正常励磁电流时，功率因数 $\cos\varphi$ 都小于1； I_f 大于和小于正常励磁电流时，功率因数分别为超前（电容性）和滞后（电感性）的。

把各条V形曲线上功率因数相同的点连接起来，得到等功率因数线，如图A.1中虚线所示。V形曲线上各运行点的功率因数可由这些曲线查出。



图A.1 同步电动机的V形曲线特性

同步电动机的突出优点，是可通过改变励磁电流来调节其无功功率，改善电网的功率因数。当励磁电流 I_f 大于正常励磁电流（过励）时，电动机功率因数为超前的。通常应使同步电动机运行于过励工况，不应运行于欠励工况（励磁电流 I_f 小于正常励磁电流）。

电动机输出功率一定时，发出的无功功率越大，所需的励磁电流就越大，定子电流也越大。在调节励磁电流时，应注意不使励磁电流和定子电流超过其额定值。

A.2.4 同步电动机的起动

同步电动机本身没有起动转矩，不能自起动。通常可采取以下起动方法。

a) 异步起动

在同步电动机转子上安装起动绕组（亦称阻尼绕组），其结构型式类似于笼型异步电动机的转子笼型绕组。定子通电后，利用该绕组产生起动转矩，使电动机自起动，起动过程与异步电动机的类似。通常，当转速达到同步转速的95%左右时，给同步电动机励磁绕组通入励磁电流，转子即可自动牵入同步。需要注意：同步电动机在异步起动时，励磁绕组既不能开路，也不能直接短路。一般在励磁绕组回路串入阻值为5~10倍励磁绕组电阻值的附加电

阻，待转速接近同步转速时，再把附加电阻切除，通入励磁电流。

b) 变频起动

大型同步电动机起动时，常将电动机改为自控式同步电动机（亦称无换向器电机），利用变频电源（调速装置）来起动。起动时，励磁绕组通入励磁电流，让变频电源输出的交流电的频率由很低值逐步升高，使电动机转速随之逐渐升高；起动完成后，切除变频电源，将电动机接到电网上运行。

A.2.5 永磁同步电动机

永磁同步电动机是用永磁体产生励磁磁场的同步电动机。其转子上没有励磁绕组，不需要通入励磁电流和消耗励磁功率，实现了无刷化。与普通电励磁同步电动机相比，其结构较简单，运行效率有所提高。

永磁同步电动机有多种结构型式，适用于多种场合。永磁同步电动机也可与电力电子变流器结合，构成调速系统。

永磁同步电动机制成后，永磁体产生的励磁磁场不能改变，难以像电励磁同步电动机那样通过调节磁场来改变无功功率和功率因数，因此需要从其他方面采取措施。

永磁电动机投入运行后，在热或电流冲击等因素的作用下，永磁体可能失磁，使电动机性能变差甚至无法使用。在使用永磁电动机时应注意这一问题。

A.3 异步电动机的特性

A.3.1 转速与频率的关系

异步电动机运行时，其转速 n 与所接电网频率 f 间不存在恒定比例关系，其转速总是低于同步转速。

A.3.2 异步电动机的类型与特点

异步电动机按照结构，可分为笼型异步电动机和绕线型异步电动机两类。笼型异步电动机的转子绕组是自行短路的多相对称绕组。绕线型异步电动机转子上布置三相对称绕组，并通过集电环和电刷引出，因此可在转子回路中串接附加电阻，以改善电动机的起动性能或调节转速（也可串入附加电动势来调节转速）。

A.3.3 机械特性

机械特性是异步电动机稳态运行中最重要的特性。三相异步电动机的机械特性是在定子电压、频率和电动机参数固定的条件下，电动机的电磁转矩 T 与转速 n 的函数关系。用曲线表示时，常以转速 n 为纵坐标，以电磁转矩 T 为横坐标，如图A.2所示。电磁转矩 T 与转速 n 成非线性关系。

三相异步电动机在外施电压及其频率都为额定值，定、转子回路不串入任何电路元件时的机械特性称为固有机械特性。其中某一条件改变后的机械特性称为人为机械特性。一般用途的三相异步电动机，转速随负载增加而略有降低，但在负载不超过额定值时，转速 n 变化很小，其固有机械特性是硬特性。

与三相异步电动机机械特性密切相关的转矩有如下三个：

a) 额定转矩 T_N

额定转矩 T_N 是电动机额定运行时产生的电磁转矩，相应的转速为额定转速 n_N 。电动机的额定工况点如图A.2中A点所示。电动机可在额定工况长期运行。由电动机铭牌上的额定功率 P_N 和额定转速 n_N ，可近似求得额定转矩 T_N ，

$$T_N \approx 9550 P_N / n_N \dots\dots\dots (A.2)$$

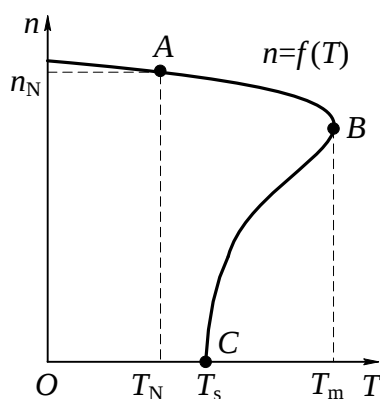
式中：

T_N ——额定转矩的数值，单位为牛·米（N·m）；

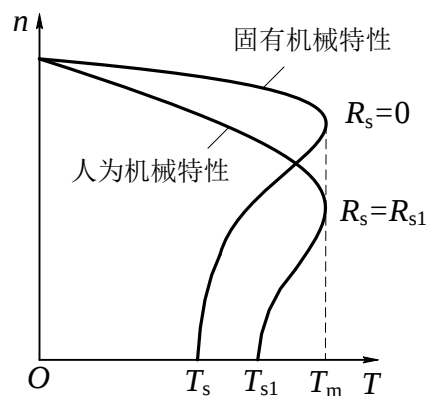
P_N ——额定功率的数值，单位为千瓦（kW）；

n_N ——额定转速的数值，单位为转每分（r/min）。

异步电动机正常运行时，负载转矩应不超过电动机的额定转矩 T_N ，以免电动机过载。



图A.2 三相异步电动机的机械特性



图A.3 固有机机械特性与人为机械特性

b) 最大转矩 T_m

三相异步电动机在额定电压和额定频率下稳态运行时能产生的最大电磁转矩称为最大转矩，如图A.2中B点所示。最大转矩 T_m 与额定转矩 T_N 的比值称为过载能力（亦称最大转矩倍数）。过载能力是异步电动机的重要性能指标之一。 T_m 越大，电动机的短时过载能力越强。

c) 堵转转矩 T_s

三相异步电动机在额定电压和额定频率下堵转时（转速 $n=0$ ）的电磁转矩称为堵转转矩，如图A.2中C点所示。堵转转矩 T_s 与额定转矩 T_N 的比值，称为堵转转矩倍数。堵转转矩 T_s 越大，堵转转矩倍数越高，电动机越容易起动。电动机在额定电压和额定频率下堵转时的定子电流 I_s ，称为堵转电流；堵转电流 I_s 与额定电流 I_N 的比值，称为堵转电流倍数。堵转转矩倍数和堵转电流倍数是衡量异步电动机性能的重要指标。

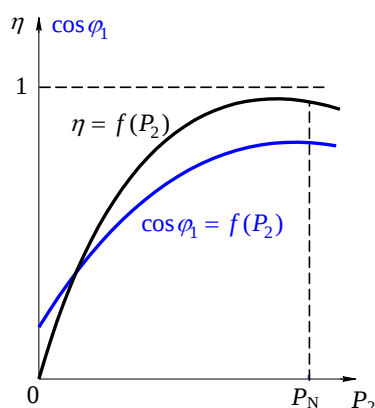
在三相绕线型异步电动机转子回路中串入三相对称的附加电阻，改变每相附加电阻 R_s 值，可得到不同的人为机械特性。增大附加电阻 R_s ，可使机械特性随最大转矩点一起向转速 n 降低的方向移动。如图A.3所示，串入附加电阻 R_s （ $R_s=R_{s1}$ ）时的堵转转矩 T_{s1} 大于未串电阻（ $R_s=0$ ）时的堵转转矩 T_s 。串入适当的附加电阻，既可提高堵转转矩，又可减小堵转电流。

A.3.4 效率特性和功率因数特性

三相异步电动机在额定电压和额定频率下运行时，定子功率因数 $\cos\varphi_1$ 、效率 η 与输出功率 P_2 的关系曲线分别称为效率特性和功率因数特性。

A.3.4.1 效率特性 $\eta=f(P_2)$

三相异步电动机的效率特性 $\eta=f(P_2)$ 如图A.4所示。电动机空载运行时，输出功率 $P_2=0$ ，因此效率 $\eta=0$ 。当 P_2 由零开始增大后，由于电动机总损耗增速较慢，因此效率 η 很快升高，通常在 P_2 为额定功率的75%左右时 η 达到最大值。 P_2 继续增大时，由于总损耗增幅迅速变大， η 反而有所降低。通常，在75%~100%额定负载范围内，效率 η 较高，运行经济性较好。



图A.4 三相异步电动机的效率特性和功率因数特性

A.3.4.2 功率因数特性 $\cos\varphi_1=f(P_2)$

三相异步电动机运行时，须从交流电网吸收电感性（滞后性）无功功率，定子功率因数 $\cos\varphi_1$ 总小于1。空载运行时， $\cos\varphi_1$ 很低（一般不超过0.2）。负载增大后， $\cos\varphi_1$ 提高，一般在额定负载附近达到最大值。负载继续增加时， $\cos\varphi_1$ 会下降。三相异步电动机的功率因数特性 $\cos\varphi_1=f(P_2)$ 如图A.4所示。

额定效率和额定功率因数也是三相异步电动机的主要性能指标。三相异步电动机在额定负载附近的功率因数和效率都较高，负载较小时的效率和功率因数都较低。在选用电动机时，应使电动机额定功率 P_N 与负载功率相匹配，以使电动机经济、合理地运行。

A.3.5 异步电动机的起动

三相异步电动机起动的主要性能指标是堵转转矩倍数和堵转电流倍数，前者应足够大，后者应尽可能小。

A.3.5.1 三相笼型异步电动机的起动

三相笼型异步电动机的起动方法主要有两种：全压起动和降压起动。

A.3.5.1.1 全压起动

把异步电动机定子绕组通过开关或接触器直接接到额定电压的交流电源上进行起动，称为全压起动。全压起动的优点是设备和操作简单，主要缺点是堵转电流较大，而堵转转矩并不大。堵转电流较大可能造成一些不利的影响。当供电电源不能满足全压起动需要时，应

采用其他起动方式（如降压起动）。

堵转转矩倍数是否足够大，与电动机负载转矩的大小和对起动时间的要求有关。电动机空载或轻载起动时，一般对堵转转矩要求不高。在重载起动，或者要求快速起动时，应选择堵转转矩倍数较大的电动机。

A.3.5.1.2 降压起动

在三相异步电动机起动时，降低定子电压以减小起动电流，这就是降压起动。降压起动时，电磁转矩随定子电压的降低而减小，故降压起动适用于对起动转矩要求不高的场合，如空载或轻载起动。

三相异步电动机常用的降压起动方法有如下几种。

a) 电抗器起动

起动时，将三相电抗器串接在定子回路中，起动后，切除电抗器，转为正常运行。

b) 星—三角起动

三相定子绕组采用三角形联结的电动机，在起动时，可将定子绕组改为星形联结，接到额定电压的电源上；起动后，再将其改成三角形联结作正常运行。

c) 自耦变压器起动

起动时，把定子绕组接在一台三相降压自耦变压器的二次侧，当转速升高到接近正常运行转速时，切除自耦变压器，把定子绕组直接接到额定电压的电源上。

d) 软起动

用软起动器（也称固态软起动器）进行起动。

软起动器是一种由晶闸管及其控制电路构成的，采用数字控制的无触点降压起动控制装置，可根据负载情况和生产要求，设定电动机的软起动方式及其起动电流变化曲线，使电动机起动平稳，且对电网冲击小，起动功率损耗小。软起动器还可实现电动机的软停机、软制动及断相、过载、欠压等保护功能，可实现电动机轻载节能运行。

软起动方法可用于无调速要求的电力传动系统中，其起动控制性能优于上述传统降压起动方法。其缺点是软起动器在运行中产生谐波，对电网和电动机产生不利影响。

除了以上方法外，还可用变频器对异步电动机进行变频起动。

A.3.5.1.3 有高堵转转矩的三相笼型异步电动机

在既要求堵转电流小、又要求堵转转矩大的场合，可采用有高堵转转矩的三相笼型异步电动机，例如转子电阻较大的电动机以及深槽或双笼异步电动机。转子电阻较大的电动机，其机械特性较软（即转速 n 随电磁转矩 T 变化而有较大变化），效率较低。深槽和双笼异步电动机有较高的效率，但转子结构较复杂。

A.3.5.2 三相绕线型异步电动机的起动

绕线型异步电动机起动时，可在每相转子回路中串入适当的附加电阻，既可增大起动转矩，又可减小起动电流。

三相绕线型异步电动机的起动方法有两种：转子串接电阻起动和转子串接频敏变阻器起

动。

a) 转子串接电阻起动

可在每相转子回路中串入适当的附加电阻 R_s （也称起动电阻），使堵转转矩 T_s 增至最大转矩 T_m ，从而利用最大转矩开始起动。为使电动机在起动中一直产生较大的电磁转矩，通常采用转子串接电阻分级起动。起动中，根据转速升高的情况，逐步切除各级起动电阻，最后将转子三相绕组短路。

转子串接的分级电阻除用于起动外，还可用于调节转速。

b) 转子串接频敏变阻器起动

起动时，将频敏变阻器串入转子回路；起动完成后，切除频敏变阻器，电动机转入正常运行。频敏变阻器的等效电阻随转速升高而自动减小，可使电动机起动时始终产生较大的电磁转矩。

A.4 高效电动机

高效电动机是输出功率与输入功率的比值，即效率值较高的电动机。一般指低损耗、高效率的通用标准型电动机。

在我国电动机效率达到或超过 GB 18613 节能评价值的，可称为高效电动机。

高效电动机可从设计、材料和工艺等诸方面采取措施，来降低损耗。例如，采用合理的定、转子槽数和风扇参数，采用正弦绕组，采用低损耗材料等。

与普通电动机相比，高效电动机的主要优点是：

a) 总损耗可减少20%以上，效率可提高2%~8%，平均效率提高约4%；

b) 满载和部分负载运行时的效率和功率因数都提高，可节约能源，为用户节省电费，降低运行成本；

c) 损耗小、发热少，温升较低，电动机的使用寿命和可靠性提高；

d) 长时间运行的节能效果比较明显，可减少对电力的需求，有助于减少二氧化碳排放量，保护环境。

虽然高效电动机的价格和运行系统的基本建设费用比普通电动机的高，但一般在2年至3年内即可通过节约电费来收回投资。因此，推广应用高效电动机有显著的经济效益和社会效益。

附录 B

(资料性附录)

电动机的调速方式

B.1 变频调速

B.1.1 三相异步电动机变频变压控制

已知同步转速 $n_1=60f_1/p$, 当电动机的极对数 p 选定后 (最少为一对极, 即 $p=1$), 运行时, 改变供电电源频率 f_1 , 就可以改变其同步转速 n_1 。当 n_1 的大小改变了, 电动机转轴的转速 n 随之而变。一般情况下, n 接近 n_1 的大小。

普通系列三相异步电动机的额定频率称为基频, 是一个标准数值。我国国家标准规定额定频率为 50 Hz。电动机变频调速时, 可以从基频向上调, 也可以从基频往下调。

三相异步电动机每相电压 U_1 为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi_m \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

U_1 ——三相异步电动机每相电压, 单位为伏 (V);

E_1 ——电动机定子绕组一相的电动势, 单位为伏 (V);

N_1 ——电动机定子绕组一相串联的有效匝数;

ϕ_m ——电动机气隙每极磁通量, 单位为韦伯 (Wb)。

调速时, 如果降低电源频率 f_1 , 同时保持电源电压 U_1 为额定值, 则随着 f_1 的下降, 电动机气隙每极磁通量 ϕ_m 增加。设计电动机磁路时, 为了节约铁磁材料, 在额定电压下, 电动机的铁心磁路已进入磁饱和状态, 若 ϕ_m 再增加, 引起电动机的励磁电流急剧增加, 这是不允许的, 电动机也无法运行。为此, 在降低电源频率 f_1 时, 必须同时降低电源电压 U_1 , 保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$, 即压频比为常数。这时, 气隙每极磁通量 ϕ_m 才能保持为常数 (额定值)。电动机能在正常变速情况下运行。

图 B.1 是三相异步电动机频率变化时的一族机械特性。它们与风机、泵负载特性 (图中曲线 1) 的交点, 就是在不同频率时电机的运行转速。可见, 改变频率就能改变电动机的转速。

关于电动机的机械特性, 对应某一频率时, 其机械特性有一最大转矩

$$T_m = C \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{f_1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

T_m ——最大转矩, 单位为牛·米 ($N \cdot m$);

C ——常数;

R_1 ——定子一相绕组的电阻, 单位为欧 (Ω);

X_1 ——定子一相的漏电抗, 单位为欧 (Ω);

X'_2 ——转子一相漏电抗的折合值, 单位为欧 (Ω);

f_1 ——频率, 单位为赫兹 (Hz)。

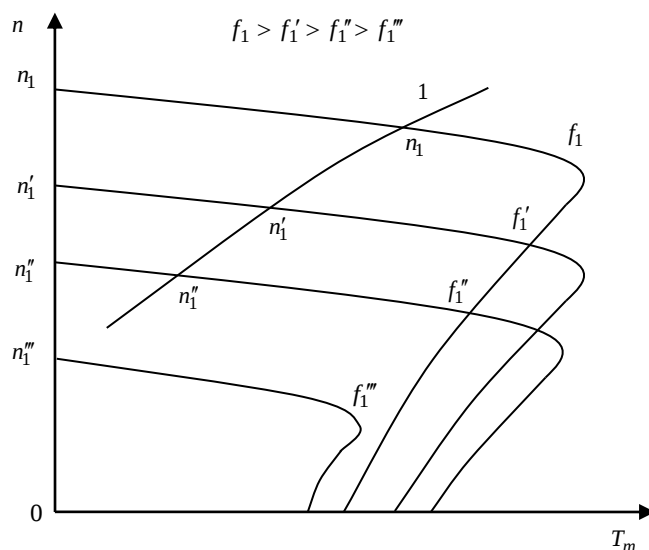


图 B.1 三相异步电动机频率变化时的机械特性

由上式看出, 虽然保持 $U/f_1 = \text{常数}$, 当 f_1 减小时, 最大转矩 T_m 不能保持为常数。已知电动机定子漏电抗 X_1 和转子漏电抗折合值 X'_2 与频率 f_1 成正比变化, 而定子电阻 R_1 却与频率 f_1 无关。因此, 在 f_1 接近额定频率时, $R_1 \ll (X_1 + X'_2)$, 从上式看出, 随着 f_1 的减小, T_m 减小得不多。但是, 当 f_1 减小很多时, $(X_1 + X'_2)$ 也减小了, 这时 R_1 的值相对变大了。这样一来, 从上式看出, 随着 f_1 减小, T_m 也减小了 (实际上气隙每极磁通量减小了)。 T_m 的减小, 意味着异步电动机在低频下运行起动转矩减小了, 不利于起动。

增加电动机定子电压 U , 可以增大气隙每极磁通势 ϕ_m 。在起动三相笼型异步电动机时, 采用大的压频比起动电动机, 称为转矩提升。根据电动机起动时负载的不同, 所选压频比值也不同。

由基频向高调的调速方式, 在风机、泵类负载改造项目用不到, 这里不作介绍。

综上所述, 三相笼型异步电动机采用变频调速有以下特点:

- a) 从基频向低调速;
- b) 调速范围大;
- c) 电动机转速稳定性好;
- d) 运行时, 电动机转速接近其同步转速, 运行效率高;
- e) 频率 f_1 可以连续调节, 因此为无级调速方式。

异步电动机采用变压变频调速，可以得到较好的调速性能。以上仅以压频比保持恒定控制的变频调速方式，通常称为变压变频调速。

B. 1. 2 三相同步电动机矢量控制

当直流电机电刷放在几何中性线时，电枢电流 i_a 产生的磁动势幅值 F_a 位于电刷位置处，如图 B. 2 所示。励磁电流 i_f 产生的磁动势 F_f 也画在同一图里。

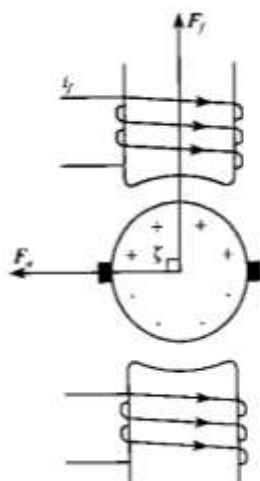


图 B. 2 直流电机示意图

假设磁动势 F_a 和 F_f 在空间都为正弦分布，可以理解为空间矢量。这里用 F_a 和 F_f 表示空间矢量。

空间相对静止的两个磁动势会产生电动力 f ，力的大小与两个磁动势的叉积成正比，即

$$f = F_a \times F_f$$

图 B. 2 中两个磁动势在空间相距 $\xi = 90^\circ$ 空间电角度时，产生的力为最大。如果电刷偏离几何中线， $\xi < 90^\circ$ ，力随之减小。

从直流电机调速原理知道，改变 F_f （即励磁电流 i_f ）或 F_a （即电枢电流 i_a ）的大小，都能调节电机的转速 n 。当 $\xi = 90^\circ$ 时，忽略电枢反应对磁路饱和的影响，单独改变 F_a 或 F_f ，可以做到互不影响，这样就可以通过改变其中一个磁动势独立调节转速，使电机具有较理想的调速特性。这种互不影响特性，称为 F_a 和 F_f 之间具有解耦控制。这种调速的方法称之为矢量控制方法。

交流电机本身具有多变量、强耦合与非线性的特点，与直流电机特性不一样。要实现高性能控制，有一定的难度。随着科技的进步，可将交流电机从基本原理上等效为直流电机，用直流电机矢量控制方法，同样可以控制交流电机。

图 B. 3 是三相同步电机定、转子绕组示意图。定子上装有三相对称绕组，转子上安装了励磁绕组。已知三相对称基波电流流经三相对称绕组，会产生以同步转速 n_1 旋转的基波磁动势 F_a ，如图 B. 3 所示。对同步电动机，其转子也应为以同步转速 n_1 逆时针方向旋转。励磁磁动势 F_f 随转子一起旋转，也画在图 B. 3 中。可见，磁动势 F_a 和 F_f 二者之间没有相对

运动。比较图 B.2 与图 B.3 两个磁动势 F_a ，它们相对于 F_f 都是静止的。也就是说，图 B.3 电机转子虽然以转速 n_1 旋转，定子绕组流的是三相对称交流电流，但站在转子上看，二者的磁动势关系完全一样，无本质区别。

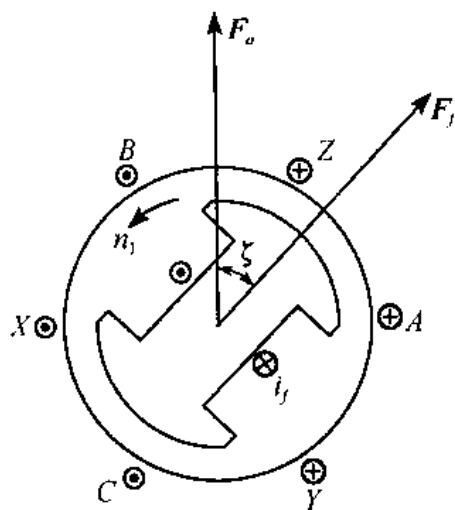


图 B.3 三相同步电机定、转子绕组示意图

图 B.3 中，两个磁动势 F_a 和 F_f 之间夹角 ζ 的大小，与电机运行工况有关。

图 B.3 中，产生励磁磁动势 F_f 的励磁电流 i_f 是直流电流。可以假想，若在电机转子上安装了另一个绕组，流过的电流是产生电枢磁动势 F_a 的电流 i_a ，显然， i_a 也应是直流电流。

通过分析，对同步电机，只要站在转子上来观察和处理 F_a 和 F_f ，即完全可以把矢量控制用到交流电机上。

矢量控制中，不用磁动势来进行分析，而用产生它的电流或者电动势、电压进行分析。为此，把对应的电压、电动势以及电流等，都称为空间矢量，分别用 u 、 e 及 i 表示。

将矢量控制用于交流电机中，会用到坐标变换以及磁场定向问题。

在图 B.3 转子磁极中线上放上坐标，称为 d 轴，与 d 轴正交处放上 q 轴坐标，如图 B.4 所示。显然，励磁磁动势 F_f 和励磁电流 i_f 矢量都落在 d 轴上。电枢磁动势 F_a 和电枢电流 i_a 也画在同一图中。

同步电机负载运行的磁动势平衡关系为

$$F_f + F_a = F_\delta \cdots \cdots \cdots (B.3)$$

式中：

F_f ——励磁磁动势，单位为安 (A)；

F_a ——电枢磁动势，单位为安 (A)；

F_δ ——合成磁动势，单位为安 (A)。

合成磁动势 F_δ 产生气隙磁密 B_δ ，把各磁动势及 B_δ 都画在图 B.4 里。

上式可用电流表示为

$$i_f + i_a = i_\delta \cdots \cdots \cdots (B.4)$$

i_{δ} ——与合成磁动势相对应的合成定子电流, 单位为安 (A)。

$$i_y = i_a \cos \beta, \quad i_r = i_a \sin \beta \dots\dots\dots (\text{B.5})$$
$$T \propto F_{\delta} F_a \sin \beta \propto \psi_{\delta} i_a \sin \beta \propto \psi_{\delta} i_l \dots \quad (\text{B.6})$$

β —— F_δ 和 F_a 之间的空间角度。

30

感应电动势 $\dot{E}_2$ ， $\dot{\psi}_{s2}$ 是转子漏磁链，它感应的漏电动势为 $-\dot{j}I_2X_2$ ， $\dot{I}_2$ 是转子相电流。已知

转子磁链 $\dot{\psi}_2 = \dot{\psi}_\delta + \dot{\psi}_{s2}$ ，它产生的合成电动势为

$$\sum \dot{E}_2 = \dot{E}_2 + (-\dot{j}I_2X_2) \cdots \cdots \cdots (B.7)$$

把 M、T 坐标系的 M 轴放在转子磁链 $\dot{\psi}_2$ 上，即 $\psi_M = \psi_2$ ， $\psi_T \approx 0$ 。定子电流 i_1 在 M、T 轴的投影分别为 i_M 和 i_T ，如图 B.5 (b) 所示。

电磁转矩 T 为

$$T = C' \psi_M i_T \cdots \cdots \cdots (B.8)$$

式中：

T ——电磁转矩，单位为牛·米 ($N \cdot m$)；

C' ——系数；

ψ_M ——转子磁链 (M 轴)，单位为韦伯 (Wb)；

i_T ——定子转矩电流，单位为安 (A)。

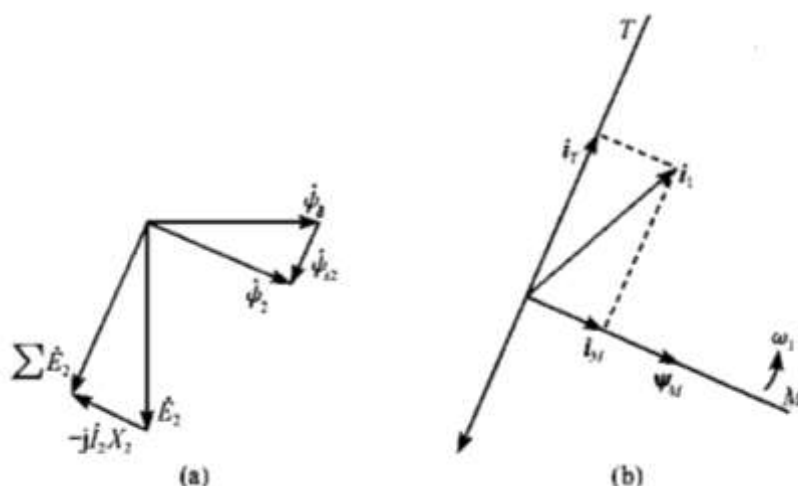


图 B.5 异步电动机转子边的相量图

从上式看出，若能维持转子磁链 ψ_M 为恒值，则电磁转矩 T 将与转矩电流 i_T 成正比，控制定子转矩电流 i_T ，就控制了电磁转矩。如果能实现转子磁场定向矢量控制，笼型异步电动机的控制特性将和他励直流电动机相似。

B. 1. 4 三相异步电动机直接转矩控制

B. 1. 4. 1 电压开关模式的选择

图 B.6 是由电压型逆变器供电的三相异步电动机调速系统的主电路。图中逆变器是由自关断器件 (如 MOSFET, IGBT, GTO 等) 构成的，可以用三个单刀双投开关状态 S_A 、 S_B 、 S_C

表示。当 $S_A = 1$ 时，表示逆变器 A 桥臂上边的开关闭合，下边的开关断开。当 $S_A = 0$ 时，则相反，表示下边的开关闭合，上边的断开。之所以能用 S_A 的两种状态表示 A 桥臂自关断器件的工作情况，是因为，在同一桥臂上的两个自关断器件不可能同时闭合或同时断开，即它们的工作状态是互补的。同样， S_B 、 S_C 的两态分别代表 B，C 桥臂上自关断器件的工作情况。这样一来，根据 S_A 、 S_B 、 S_C 为 0 或为 1，可以组合出 2^3 个状态，如表 B.1 所示。

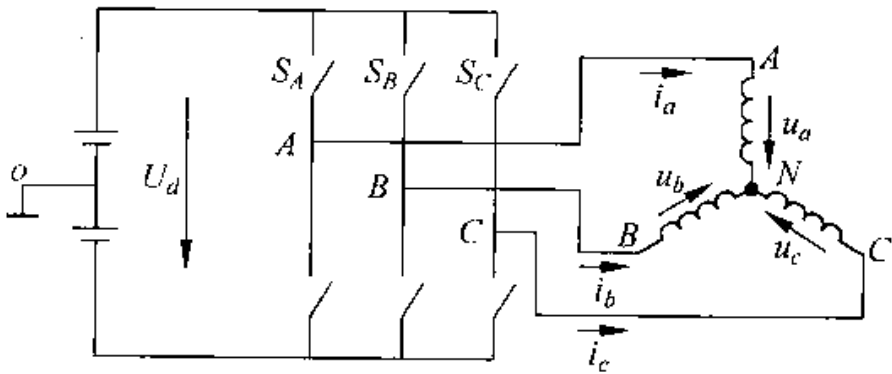


图 B.6 自关断器件构成的逆变器

表 B.1 逆变器开关状态

状态	$S_A S_B S_C$	$F_i (S_A S_B S_C)$	$u_i (S_A S_B S_C)$
0	0 0 0	$F_0 (0 0 0)$	$u_0 (0 0 0)$
1	0 0 1	$F_1 (0 0 1)$	$u_1 (0 0 1)$
2	0 1 0	$F_2 (0 1 0)$	$u_2 (0 1 0)$
3	0 1 1	$F_3 (0 1 1)$	$u_3 (0 1 1)$
4	1 0 0	$F_4 (1 0 0)$	$u_4 (1 0 0)$
5	1 0 1	$F_5 (1 0 1)$	$u_5 (1 0 1)$
6	1 1 0	$F_6 (1 1 0)$	$u_6 (1 1 0)$
7	1 1 1	$F_7 (1 1 1)$	$u_7 (1 1 1)$

下面分析三相异步电动机在 180° 导电的电压型逆变器供电时，表 B.1 所示的每一种状态产生气隙磁场情况。先看 $S_A S_B S_C$ 为 (0 0 0) 及 (1 1 1) 两种状态。这两种状态，图 B.6 中的逆变器，或是三个桥臂下面的开关全闭合，或是上面的开关全闭合，但不管是哪种状态，电机定子三相绕组都被短路，不会产生任何磁场。其他六种状态则不同了。以状态 1，即

$S_A S_B S_C = (0 \ 0 \ 1)$ 为例, 这时, A, B 桥臂下边的开关闭合, C 桥臂上边的开关闭合, 于是, 直流电压 U_d 在定子三相绕组中产生电流 i_a 、 i_b 、 i_c , 其电流瞬时实际方向如图 B.7(a) 所示。三相定子电流产生的合成磁动势用空间矢量 F_1 (0 0 1) 表示, 其作用方向如图 B.7(b) 所示, 距+A 轴 240° 空间电角度。相应地, 产生三相电流和磁动势的电压, 用 u_1 (0 0 1) 来表示。用类似的办法把其余状态 2 至状态 6, 定子电流产生的合成磁动势 F_2 (0 1 0) 至 F_6 (1 1 0) 都画在图 B.7(b) 里。各磁动势矢量的幅值彼此相等, 产生的磁链大小也相等, 仅在空间相位不同。刚才提到的两个状态 $S_A S_B S_C$ 为 (0 0 0) 及 (1 1 1), 虽然不产生空间磁动势, 但仍用矢量 F_0 (0 0 0) 和 F_7 (1 1 1) 表示, 只不过它们都为零罢了。为此, 把这两个矢量 F_0 (0 0 0) 和 F_7 (1 1 1) 叫零矢量。显然, 其余的 6 个磁动势都是非零矢量。同样, 与这些状态相应的电压 u_i ($S_A S_B S_C$), $i=0, 1, 2, \dots, 7$, 称为电压空间矢量, 也列在表 B.1 中。

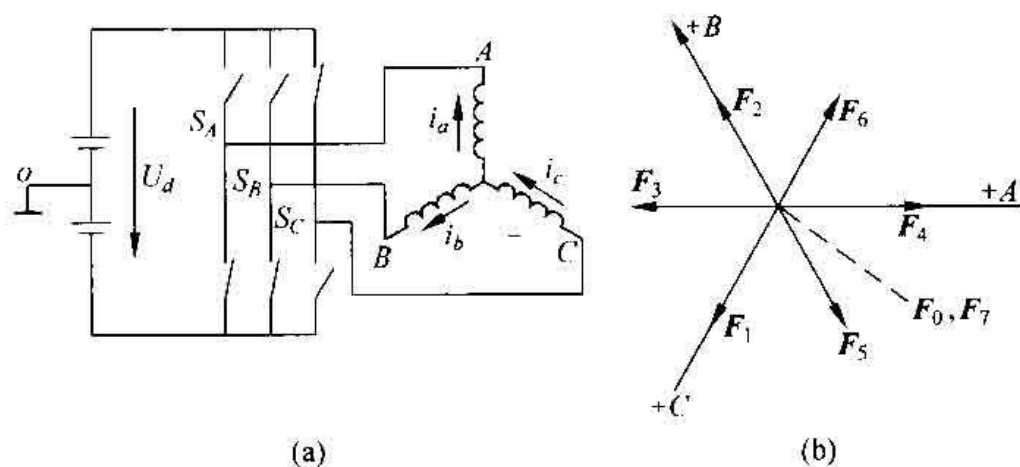


图 B.7 直接转矩控制等效主电路及磁动势矢量

从图 B.7(b) 看出, 如果能控制图 B.7(a) 中逆变器的开关状态, 使其按状态 1, 3, 2, 6, 4, 5, 1 顺序变化, 则在电机气隙空间上作用的磁动势及磁链变化的轨迹为正六边形, 旋转方向为顺时针。改变逆变器各状态切换的次序, 如按状态 1, 5, 4, 6, 2, 3, 1 顺序, 则气隙磁动势及磁链变化的轨迹仍为正六边形, 旋转方向则为逆时针。

令 ψ_{si} , i_{si} 分别代表逆变器工作在第 i 状态时定子绕组的全磁链及电流, 则电压

$u_i(S_A S_B S_C)$ 的关系式为

$$u_i(S_A S_B S_C) = \frac{d\psi_{si}}{dt} + i_{si} R_s \dots\dots\dots (B.9)$$

式中, R_s 是定子绕组两并一串的总电阻。

在忽略电阻 R_s 的情况下, 式 (B.9) 变为

$$\left. \begin{aligned} u_i(S_A S_B S_C) &= \frac{d\psi_{si}}{dt} \\ \text{或} \\ u_i(S_A S_B S_C) &= \frac{\Delta\psi_{si}}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (B.10)$$

也就是说, 施加在电动机定子绕组上的电压 $u_i(S_A S_B S_C)$ 持续 Δt 时间内, 所产生的磁链为 $\Delta\psi_{si} = u_i(S_A S_B S_C)\Delta t$ 。

由于电压和磁动势及电流等的上述关系, 在下面的分析中, 将改用定子电压 $u_i(S_A S_B S_C)$ 来表达图 B.7 (b) 各空间磁动势矢量, 并可将电压 $u_i(S_A S_B S_C)$ 写成如下的矢量形式

$$u_i(S_A S_B S_C) = U_d (S_A + S_B e^{j120^\circ} + S_C e^{j240^\circ}) \quad i = 0, 1, 2, \dots, 7 \dots\dots (B.11)$$

由式 (B.11) 可以看出, 逆变器工作在第 i 状态时, 施加在电动机定子绕组上的电压空间矢量 $u_i(S_A S_B S_C)$ 在复平面上的位置与它产生的磁动势的空间位置一致。

根据式 (B.11), 把各电压空间矢量画在图 B.8 (a) 的复数坐标里, 其中 α 为实轴, 也是 A 相绕组的轴线, $j\beta$ 是虚轴。从图中看出, 电压空间矢量 u_1 至 u_6 都为非零电压矢量, 其模为 U_d 。与图 B.7 (b) 比较时, 可以看出, $F_i(S_A S_B S_C)$ 的大小及位置和 $u_i(S_A S_B S_C)$ 完全对应。如果把图 B.8 (a) 中的电压空间矢量画成图 (b) 的样子, 则为正六边形。

B.1.4.2 电动机定子绕组相电压波形

如果用图 B.8 (b) 中构成正六边形的电压空间矢量进行控制, 则 6 种非零电压空间矢量将依次加在电动机的定子绕组上, 并且, 每一电压空间矢量持续 60° 电角度。下面分析在这种运行情况下的电机定子绕组相电压的波形。

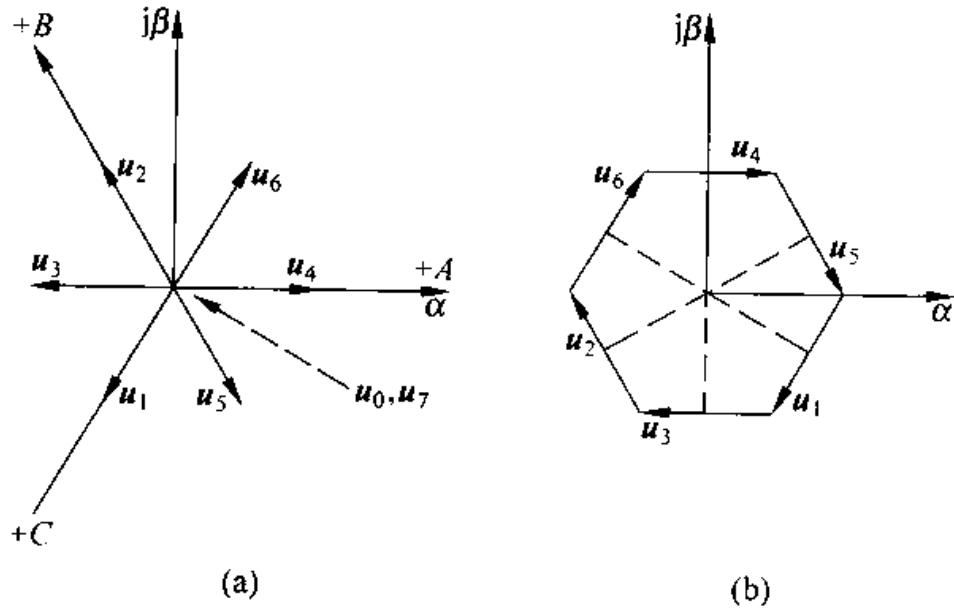


图 B. 8 电压空间矢量

以 A 相为例, 令电动机定子绕组端点 A, B, C 对电源中点 O 之间的电压分别为 u_{Ao} 、 u_{Bo} 、 u_{Co} , 绕组中点 N 对 O 之间的电压为 u_{No} , 则在逆变器处于 (1 0 0) 状态时, 从图 B. 6 中可看出, 这时

$$u_{Ao} = \frac{1}{2}U_d, \quad u_{Bo} = -\frac{1}{2}U_d, \quad u_{Co} = -\frac{1}{2}U_d$$

此外

$$u_b = u_c = -\frac{1}{2}u_a$$

即

$$u_a + u_b + u_c = 0$$

由于

$$u_{No} = u_{Ao} - u_a = u_{Bo} - u_b = u_{Co} - u_c$$

因此

$$3u_{No} = u_{Ao} + u_{Bo} + u_{Co}$$

于是有

$$u_{No} = \frac{1}{3}(u_{Ao} + u_{Bo} + u_{Co})$$

A 相相电压 u_a 为

$$u_a = u_{Ao} - u_{No} = \frac{2}{3}U_d$$

当逆变器切换为 (1 1 0) 状态时, 从图 B. 7 中可看出, 这时有

$$u_{Ao} = u_{Bo} = \frac{1}{2}U_d$$

$$u_{Co} = -\frac{1}{2}U_d$$

$$u_{No} = \frac{1}{6}U_d, \quad u_a = \frac{1}{3}U_d$$

之后，逆变器切换为 (0 1 0)、(0 1 1)、(0 0 1) 及 (1 0 1) 等状态，用上述的方法可分别求出 A 相电压 u_a 以及中点对地电压 u_{No} ，将各状态下的 u_a 、 u_{No} 画成曲线，如图 B.9 所示。它相当于 180° 导电型方波输出逆变器的波形。由于电压 u_{No} 在 $\pm U_d/6$ 间摆动，使相电压的幅值达 $2U_d/3$ ，高于普通 PWM 逆变器输出的幅值，这是这种工作方式逆变器的优点之一。

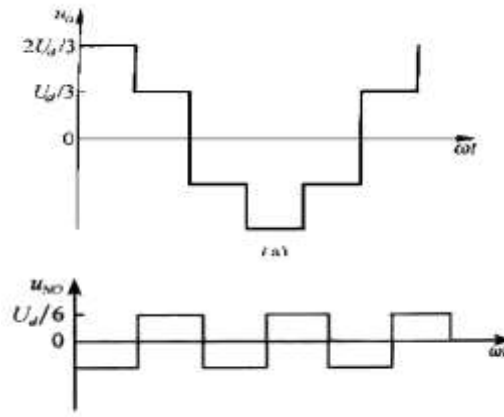


图 B.9 u_a 及 u_{No} 的波形

同样，可求出 B、C 相相电压 u_b ， u_c 的波形，它们与 A 相的波形完全一样，只是在相位上彼此互差 120° 时间电角度。

B. 1. 4. 3 定子磁链轨迹

关于定子磁链 ψ_{si} 的变化轨迹。从式 (B. 10) 看出，当电机定子绕组上施加电压空间矢量 $u_i(S_A S_B S_C)$ 后，在 Δt 的时间内，在电机气隙中将产生与 $u_i(S_A S_B S_C)$ 相同方向的磁链 $|\Delta \psi_{si}| = u_i(S_A S_B S_C) \Delta t$ ，即 $|\Delta \psi_{si}|$ 的大小与 $|u_i|$ 的大小和作用的时间 Δt 有关。但其方向则可能与该电压作用前已存在的磁链 ψ_s 的方向不同，其总磁链 ψ_{si} 应为二者的矢量和，即

$$\psi_{si} = \Delta \psi_{si} + \psi_s$$

由于直接转矩控制是控制逆变器按一定规律变化的开关状态，因此，如果合理地选择各电压空间矢量，就有可能获得幅值不变而又匀速旋转的定子磁链，即所谓的圆形轨迹定子磁

链。实际上，用这种办法要想获得绝对的圆形轨迹定子磁链几乎是不可能的。在工程应用中没有必要过分追求定子磁链旋转轨迹为绝对的圆形，只要接近圆形就足够了。为此，在选择逆变器的开关状态时，允许定子磁链的瞬时转速及幅值有一定的误差。

为了能准确地确定某瞬时定子磁链的空间位置，把图 B. 8 (a) 均匀地分成六个区域，每个区域占 $\pi/3$ 电角度，分别标以 $\theta(1)$ 、 $\theta(2) \cdots \theta(6)$ ，如图 B. 10 所示。图中画了三个圆，虚线圆表示定子磁链幅值的给定值，用 $|\psi_s^*|$ 表示，两个实线圆表示定子磁链幅值的实际值，用 $|\psi_s|$ 表示，它们的半径之差 $2\Delta|\psi_s|$ 为允许误差。在运行中，要求定子磁链 $|\psi_s|$ 能满足如下关系

$$|\psi_s^*| - \Delta|\psi_s| \leq |\psi_s| \leq |\psi_s^*| + \Delta|\psi_s| \quad \cdots \cdots \cdots (B. 12)$$

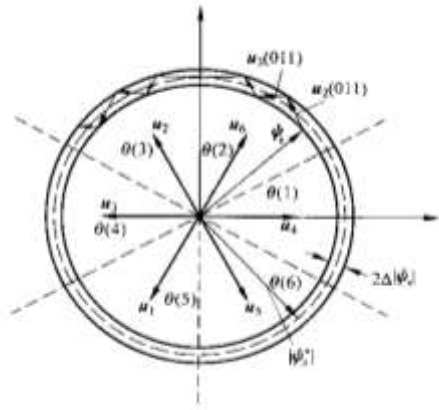


图 B. 10 电压空间矢量分区图

下面举例说明。例如，设定子原有磁链 $|\psi_s|$ 位于 $\theta(2)$ 区域内，并有的 $|\psi_s^*| - \Delta|\psi_s|$ 值，如图 B. 10 所示。如果要求定子磁链逆时针方向旋转时，则分别选择电压空间矢量 u_2 (0 1 0) 和 u_3 (0 1 1)，就能满足式 (B. 12) 的关系。从图 B. 10 中看出，当 u_2 (0 1 0) 电压空间矢量的作用使定子磁链 $|\psi_s|$ 达上限值 $|\psi_s^*| + \Delta|\psi_s|$ 后，如采用滞环控制把逆变器切换为 u_3 (0 1 1) 状态时，定子磁链 $|\psi_s|$ 将沿电压空间矢量 u_3 的方向移动，直到幅值达下限值 $|\psi_s^*| - \Delta|\psi_s|$ 为止。之后，再进行逆变器工作状态的切换，只要定子磁链 $|\psi_s|$ 不出 $\theta(2)$ 区，则反复施加 u_2 和 u_3 电压空间矢量。但是，当定子磁链 $|\psi_s|$ 进入 $\theta(3)$ 区后，则需让逆变器反复工作在 u_3 和 u_1 状态，才能满足式 (B. 12) 的要求。其他各区的情况依此类推，见表 B. 2。

如果要求定子磁链顺时针方向旋转，还是以定子磁链 $|\psi_s|$ 位于 $\theta(2)$ 区为例，则应选择电压空间矢量 u_4 和 u_5 。其他区域的工作情况，依此类推。

在运行中，由于某种原因出现了定子磁链 $|\psi_s|$ 小于以 $|\psi_s^*| - \Delta|\psi_s|$ ，且当 $|\psi_s|$ 处于 $\theta(2)$ 区时，应选电压空间矢量 u_6 ，使 $|\psi_s|$ 迅速增大；同样，若 $|\psi_s|$ 大于 $|\psi_s^*| + \Delta|\psi_s|$ ，选 u_1 即可使 $|\psi_s|$ 迅速减小。

为了实现对上述定子磁链的控制，需采用图 B. 11 (a) 及 (b) 的磁链位置检测和滞环控制技术。首先，根据实测的定子磁链 ψ_s ，经图 B. 11 (a) 后，得该磁链所处的 $\theta(N)$ 区域，其中 $N=1, 2, \dots, 6$ 。图 B. 11 (b) 中，定子磁链给定值 $|\psi_s^*|$ 与反馈值 $|\psi_s|$ 进行比较，若滞环控制器输出 D_ψ 为“+”信号，表示要求增加定子磁链，如在 $\theta(2)$ 区时，则选 u_2 。如果滞环控制器输出 D_ψ 为“-”信号，表示要求减小定子磁链，如在 $\theta(2)$ 区时，选地 u_3 。如果滞环控制器输出 D_ψ 为“++”信号或“- -”信号，分别表示要求迅速增大或减小定子磁链，如在 $\theta(2)$ 区时，应选 u_6 或 u_1 电压空间矢量。其他各区域的情况，都列在表 B. 2 中。

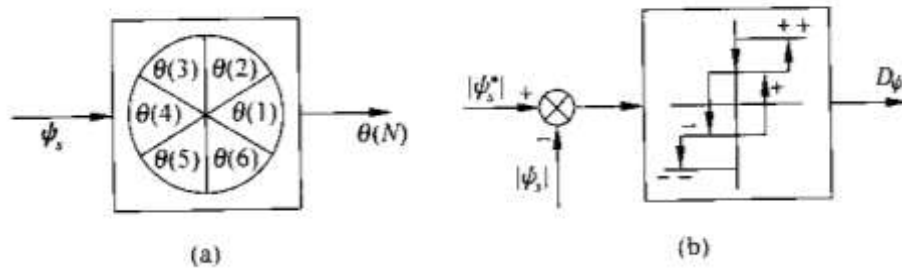


图 B. 11 磁链位置检测及滞环控制

表 B. 2 逆变器开关状态表

$\theta(N)$ $D_\psi \backslash D_T$		1	2	3	4	5	6
++	+	u_6	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4
	0	u_4	u_6	u_2	u_3	u_1	u_5
	-	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3	u_1
+	+	u_6	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4

表 B. 2 逆变器开关状态表（续）

$\begin{matrix} \theta(N) \\ D_\psi / D_T \end{matrix}$		1	2	3	4	5	6
+	0	u_7	u_0	u_7	u_0	u_7	u_0
	—	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3	u_1
—	+	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4	u_6
	0	u_0	u_7	u_0	u_7	u_0	u_7
	—	u_1	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3
— —	+	u_2	u_3	u_1	u_5	u_4	u_6
	0	u_3	u_1	u_5	u_4	u_6	u_2
	—	u_1	u_5	u_4	u_6	u_2	u_3

根据上述对定子磁链的限幅控制，就能获得近似于圆形旋转的定子磁链。

下面分析如何控制定子磁链沿圆周方向的旋转速度。定子磁链向哪个方向旋转，由所选择的电压空间矢量确定。例如，处于 $\theta(2)$ 区的定子磁链，当选择 u_2 时，则逆时针方向旋转；选择 u_4 时，则顺时针方向旋转。如果选择零电压空间矢量，则定子磁链的速度为零，即在原地不动。根据以上定子磁链三种特定的速度，在直接转矩控制时，将它们按一定比例进行调制，或者叫混合。其结果是，定子磁链在圆周方向表现为走走、停停，或者正走走、反走走。这样一来，从宏观上看，就能获得任意的定子磁链平均旋转速度。这种调制的频率越高，所得平均旋转速度越均匀，同时，电机的电磁转矩脉动也较小。

B. 1. 4. 4 电磁转矩控制

在前面介绍圆形旋转定子磁链时，曾举例说明，当定子磁链 ψ_s 位于 $\theta(2)$ 区域内，并要求它逆时针方向旋转，应分别选择电压空间矢量 u_2 和 u_3 ，如图 B. 10 所示。但是，不管逆变器切换为 u_2 状态，还是 u_3 状态，两种情况都会产生电磁转矩。不同的是， u_2 、 u_3 状态仅仅是定子磁链分别在增大、减小情况下产生的电磁转矩。这是因为，电压空间矢量 u_2 或 u_3 将在气隙中产生与其相同方向的磁链 $\Delta\psi_{s2}$ 或 $\Delta\psi_{s3}$ 并与其作用前已存在的磁链 ψ_s 方向不同。同样，当定于磁链位于 $\theta(2)$ 区时，我们又分别选择了电压空间矢量 u_4 或 u_5 ，显然，在这两种状态下，也是在定子磁链增大、减小情况下分别产生电磁转矩。但是，如果我们要求

定子磁链为逆时针方向旋转，使电机转子也为逆时针方向旋转，则这两种状态下的电磁转矩对电机来说，表现为制动性转矩。

当定子磁链位于 $\theta(2)$ 区中间位置，逆变器工作在 u_6 或 u_1 ，状态时，由于它们只产生相同方向的磁链，因而不产生电磁转矩。

不管定子磁链位于哪个区域，施加零电压空间矢量 u_0 或 u_7 时，因不产生新磁链，所以也不产生电磁转矩。

可用滞环控制来控制电动机的电磁转矩，如图 B. 12 (a) 所示，图 (b) 是电磁转矩的波形。当电磁转矩给定值 T^* 与反馈值 T 进行比较时，若图 B. 12 (a) 中的滞环控制器输出 D_T 为“+”信号，表示要求增大电磁转矩。若定子磁链位于 $\theta(2)$ 区，则应选择 u_2 或 u_3 电压空间矢量。无论是选择 u_2 或 u_3 电压空间矢量，产生的电磁转矩都要增大，如图 (b) 中的曲线 1。这是由于定子磁链瞬时旋转角速度比转子角速度高引起的。当电磁转矩增大到与给定值 T^* 相等时，滞环控制器输出 D_T 为“0”信号，这时逆变器处于零电压空间矢量 u_0 或 u_7 状态。至于选 u_0 或选 u_7 ，要根据逆变器开关元件切换次数最少的原则而定，其目的是为了减少元件的开关损耗。零电压空间矢量作用期间，电磁转矩衰减，直至电磁转矩减小到使滞环控制器输出 D_T 又为“+”信号时，切换非零电压空间矢量 u_2 或 u_3 电磁转矩又回升，如图 B. 12 (b) 所示。

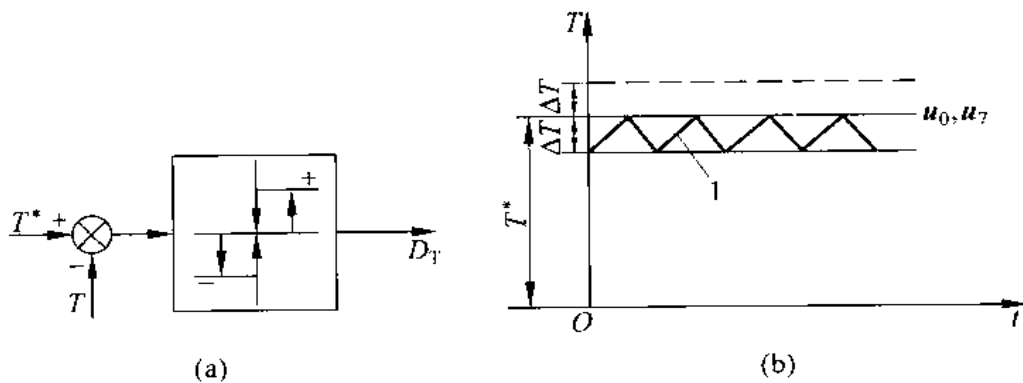


图 B. 12 电磁转矩滞环控制及其波形

若由于某种原因，电磁转矩 T 大于给定值 T^* ，则滞环控制器输出 D_T 为“-”信号，当定子磁链在 $\theta(2)$ 区时，选电压空间矢量 u_4 或 u_5 。不管选 u_4 或 u_5 ，产生的都是制动性电磁转矩，使 T 值减小。

表 B.2 列出了 6 个区域里可供选择的电压空间矢量。根据定子磁链位置检测信号 $\theta(N)$ 、滞环控制信号 D_ψ 和 D_T 来选择合适的电压空间矢量，进行控制。

B.1.5 变频装置的种类

B.1.5.1 两电平交直交低压变频器

图 B.13 是低压两电平变频器主电路拓扑图，简称低压变频器。它由不控整流桥与逆变桥组成，属电压型变频器。逆变桥每个桥臂上由一个自关断器件 IGBT 组成。采用脉宽调制（PWM）控制，逆变器输出电压波形如图 B.14 所示，除基波外，尚有一系列谐波。

如果图 B.13 桥臂上器件用 3300V IGBT，这种电路拓扑可以实现输出电压达 1140V，功率可达 400 kW。

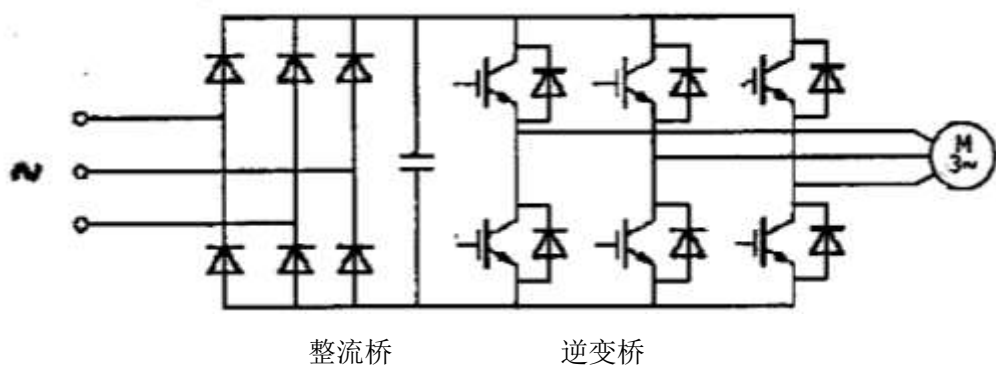


图 B.13 低压两电平变频主电路拓扑

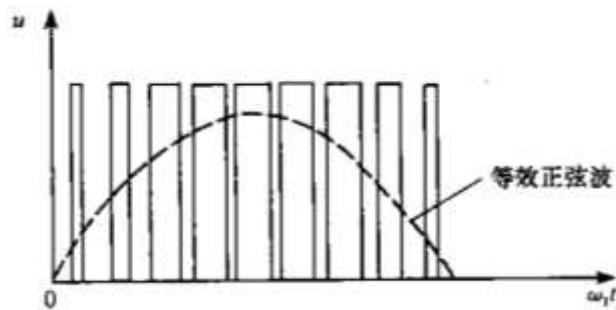


图 B.14 低压两电平变频器输出电压波形

表 B.3 是低压变频器与电机的功率匹配表

表 B.3 低压变频器与电机功率匹配表

最大适用电机 容量 (kW)	输 出			
	额定容量 (kVA)	额定电流 (A)	最大电压	最高频率
0.4	1.4	1.8	三相 380V / 400V / 415V / 440V / 480V (对应输入电压)	参数设定可对 应至 400 Hz
0.75	2.6	3.4		
1.5	3.7	4.8		
2.2	4.7	6.2		
3.7	6.9	9		

表 B.3 低压变频器与电机功率匹配表（续）

最大适用电机 容量（kW）	输 出			
	额定容量（kVA）	额定电流（A）	最大电压	最高频率
5.5	11	15	三相 380 V /400 V/415 V /440 V /480 V（对应输 入电压）	参数设定可对 应至 400 Hz
7.5	16	21		
11	21	27		
15	26	34		
18.5	32	42		
22	40	52		
30	50	65		
37	61	80		
45	74	97		
55	98	128		
75	130	165		
90	150	195		
110	180	240		
132	210	270		
160	230	302		
185	280	370		
220	340	450		
300	460	605		

B.1.5.2 二极管钳位式三电平逆变器

图 B.15 是二极管钳位式三电平逆变器。逆变桥每个桥臂上有两个 IGBT 组成，也属于电压型逆变器。同样采用 PWM 控制，其输出波形如图 B.16 所示，可见输出电压波形为三电平，如果加装滤波器，输出电压接近正弦波。

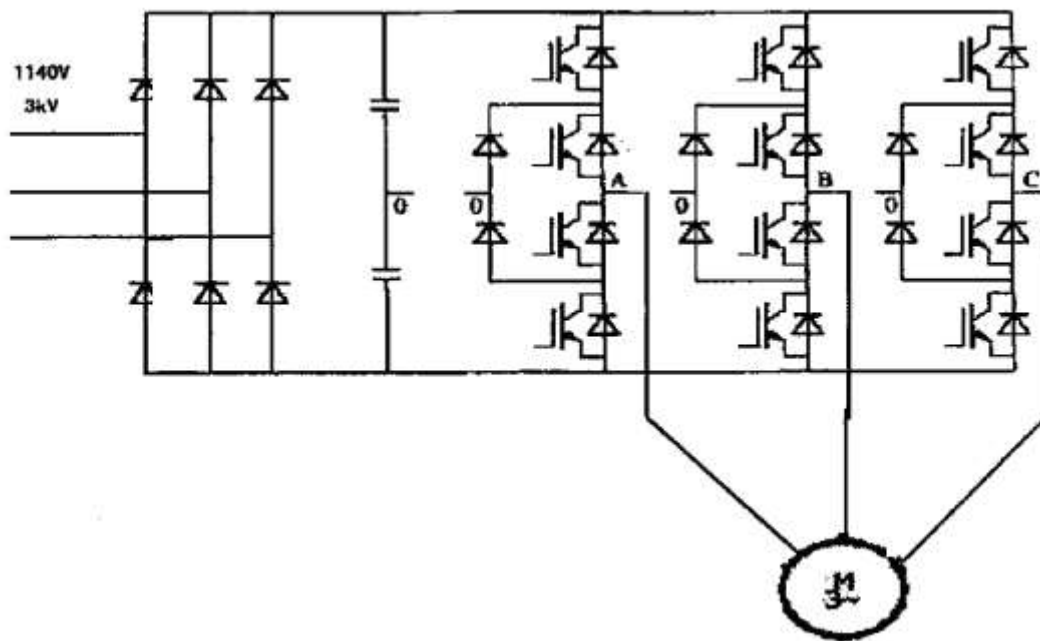


图 B. 15 二极管钳位式三电平逆变器



图 B. 16 二极管钳位式三电平逆变器的输出波形

这种变频器与两电平逆变器相比较，其优点为：

- a) 输出波形更近于正弦，谐波较小；
- b) dv/dt 也较小；
- c) 与两电平变频器相比，在同样条件下，开关频率降低一半，器件开关损耗小。

桥臂上的器件若采用 3300 V IGBT，输出电压可达 3000 V，输出功率达上千千瓦。

B. 1. 5. 3 高压串联 H 桥变频器

图 B. 17 是低电压交直交电压型单相输出的变频器，例如输入交流 50 Hz、690 V 电压，则输出约 690V 左右电压、频率可调的单相电源，称为功率单元。这种电路拓扑也称为 H 桥。

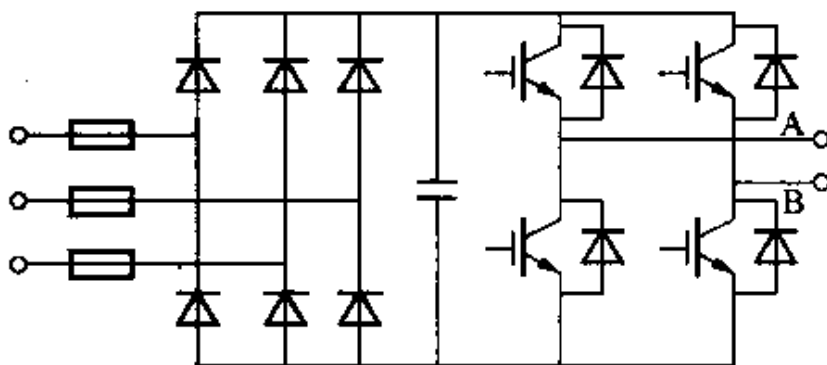


图 B. 17 功率单元

采用一台移相变压器，其一次绕组额定电压可以为 6kV 或 10kV，二次侧有多套三相对称低压绕组，例如，每套绕组的线电压为 690V。每套三相对称绕组输出的 690V 电压作为图 B. 17 功率单元的输入电压，然后再将几个（例如 5 个）相同功率单元的输出单相电压彼此串联起来组成一相，即串联 H 桥，其相电压达 $690 \times 5 = 3450\text{V}$ 。其他两相也都用 5 个功率单元彼此串联，再把变频器三相输出接成 Y 接，则可实现总输出电压为 $\sqrt{3} \times 3450 \approx 6000\text{V}$ 可变压变频的高压，给三相 6kV 高压电动机供电，实现变速运行。如果网侧电压为 10kV，变压器二次侧每相至少需要 8 套（有的 9 套）独立的低压三相对称绕组，给 8 个（或 9 个）功率单元供电（整机共 24 个或 27 个）。变频器则输出 10kV 可变压变频给 10kV 电动机供电。

为了减小网侧谐波把变压器做成移相式变压器，即变压器二次侧的每个三相对称绕组输出线电压彼此要移相。如果是 5 个功率单元串联，则彼此相互移相 12° 电角度；如果是 8 个功率单元串联，则移相角度为 7.5° 电角度。经过移相处理，网侧谐波含量极小。

图 B. 18 为每相由 5 个功率单元组成的多电平变频器。由于变频器每相采用功率单元串联技术，其输出电压为 11 电平阶梯波，如图 B. 19 所示。可见，这种波形更接近正弦波。不会增加电动机的损耗。

由于输出阶梯形电压波形，其 dv/dt 也很小，对电机绝缘无任何影响。

表 B. 4 是高压变频器与电机功率匹配表。

表 B. 4 高压变频器与电机功率匹配

额定电压 (kV)	变频器额定容量 (kVA)	适配电机功率 (kW)
6	400	315
6	500	400
6, 10	625	500
6, 10	800	630
6, 10	1000	800
6, 10	1250	1000
6, 10	1600	1250

表 B.4 高压变频器与电机功率匹配（续）

额定电压（kV）	变频器额定容量（kVA）	适配电机功率（kW）
6，10	1800	1400
6，10	2000	1600
6，10	2250	1800
6，10	2500	2000

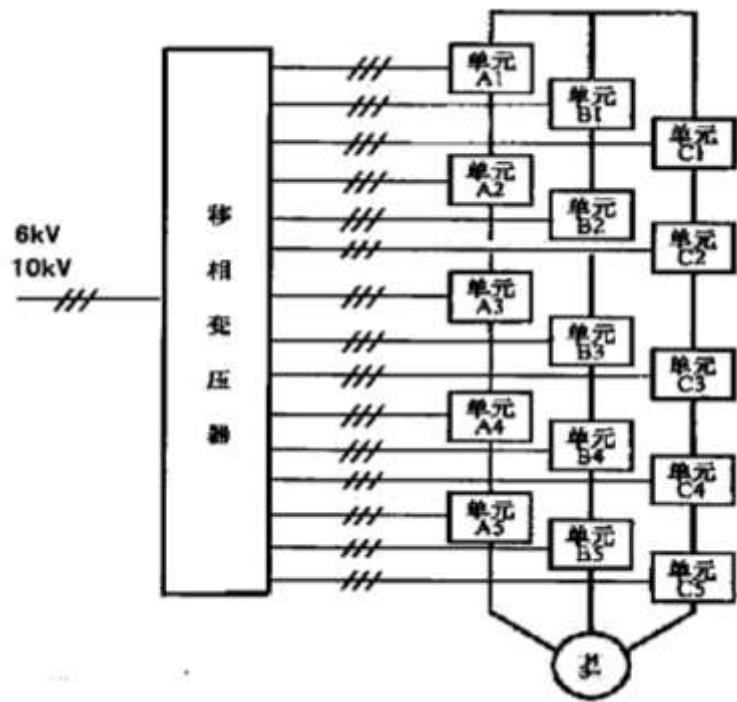


图 B.18 每相由 5 个功率单元组成的串联 H 桥变频器

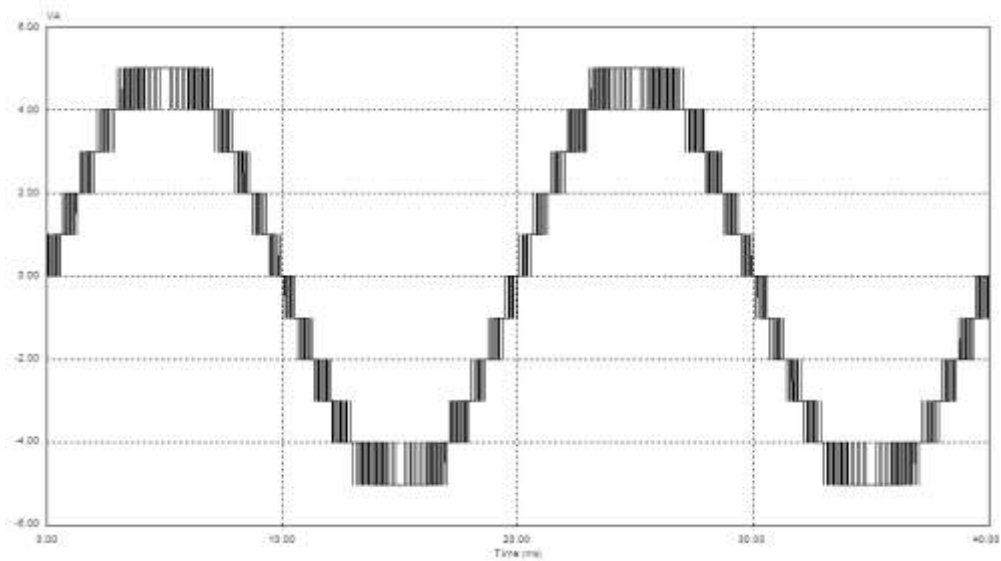


图 B.19 输出电压波形

B.1.6 风机与泵压力、流量闭环控制

根据用户的使用要求,有时需要保持介质的压力或流量为恒定,有些工况又需要其随时间按某种规律变化。这就是说,对风机、泵负载,其控制对象不是电动机的转速,而是介质的压力(如管网压力、炉膛压力、液位高度等)或流量(气体、液体的流量等)。为了满足用户使用的要求,应采用闭环控制。

图 B. 20 所示为压力、流量闭环控制框图。其工作原理为,用户要求风机、泵系统的工作压力或流量作为给定值输入,再与被控系统实测的压力或流量(都应变换为电量)进行比较,经 PID 调节器,得到变频调速系统的给定频率,即电动机的转速,以实现用户要求的压力或流量。

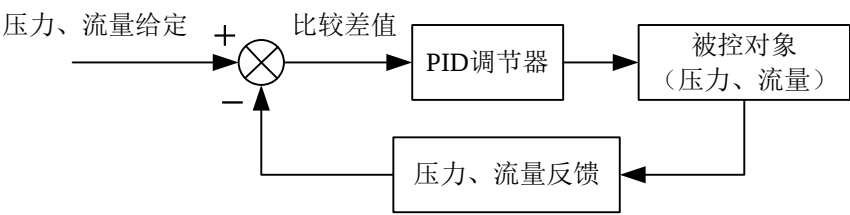


图 B. 20 压力、流量闭环控制框图

从技术角度看,压力或流量闭环控制效率最高,负载需要多大的压力或流量,通过变频调速系统控制风机、泵转速自动实现。运行中,除系统自身的损耗外,不存在其他诸如节流、回流等损耗,节能效果显著。

B. 1. 7 异步电动机变频器启动

B. 1. 7. 1 启动电流

异步电动机在工频直接启动过程中,启动电流高达 5~7 倍额定电流,持续时间为数秒乃至数十秒。启动电流大,导致电网电压瞬间下降,有可能使继电保护误动作,或干扰同一母线上其他用电设备正常运行。

变频启动异步电动机是较好的启动方式,它具有启动转矩大,启动电流小的优点。

B. 1. 7. 2 启动接线图

图 B. 21 是最简单的异步电机变频启动接线图。闭合断路器 DL₁、DL₂,断开 DL₃(DL₂与 DL₃应互锁),用变频器将电动机由低速启动到略高于同步转速,然后断开 DL₂,同时变频器停止运行,电动机自由滑行,闭合 DL₃,即把电动机直接接入工频电源,完成启动过程。

图 B. 21 的启动方式较简单,但在将电动机投入电网瞬间,一般仍会产生 2~3 倍额定电流(时间很短),但对电网的影响减小了。

对有些电动机,当断开 DL₂时,尽管定子绕组无外接电压了,但转子电流衰减需要一定的时间,即气隙仍有磁场存在,电动机在旋转,会在其定子绕组里感应电动势,当 DL₃闭合瞬间,产生较大的冲击电流,有时高达十几倍额定电流。严重时,会将断路器触点焊死,打不开。这种情况,一般很少遇到。

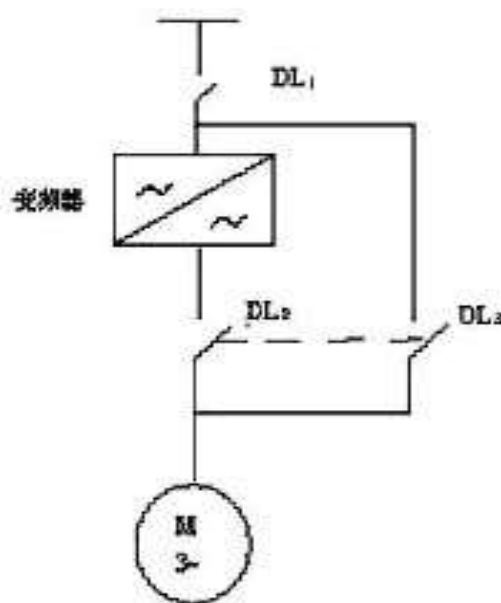


图 B. 21 变频软起动接线图

B. 1. 8 变频调速应用举例

B. 1. 8. 1 送风机变频调速应用

送风机是火电厂锅炉机组的重要辅机，每台锅炉安装两台，同时运行。每台风机能满足锅炉额定出力 70% 的风量需要。为了确保汽轮发电机组稳发、满发，送风机一刻都不能停止运行。

火电厂发电负荷有时是变化的，尤其是调频电厂，需要对锅炉燃烧工况进行调节。其中调节风量也是至关重要的。现实中，电厂风机的额定容量通常大于实际的需要量，其配套电动机的额定容量则更大。实际运行时，采用关小风门进行节流。有时在额定工况下，风门开度也仅为 60%~70%，在此基础上再进行阀门调节，满足工况需求。这样人为地增加了管道阻力，浪费大量电能。

如果送风机采用调速运行，效果较好。图 B. 22 是某火电厂一台锅炉的两台送风机，采用一拖一手动旁路控制系统。图中由 6 个高压隔离开关 DL₁₁、DL₁₂、DL₁₃、DL₂₁、DL₂₂ 和 DL₂₃ 组成。要求 DL₁₂ 和 DL₁₃、DL₂₂ 和 DL₂₃ 不能同时闭合，在机械上实现互锁，防止变频器输出与 6 kV 电源短路。正常运行时，断开 DL₁₃，闭合 DL₁₁、DL₁₂ 隔离开关，1#送风机处于变频运行状态。断开 DL₂₃，闭合 DL₂₁、DL₂₂ 隔离开关，2#送风机处于变频运行状态。

当机组运行过程中，若 1#送风机的变频器出现故障，则应把 DL₁₁、DL₁₂ 断开，闭合 DL₁₃，系统即转为工频运行，保证机组运行的安全性。2#送风机变频器出现故障时，采用同样的方法处理。

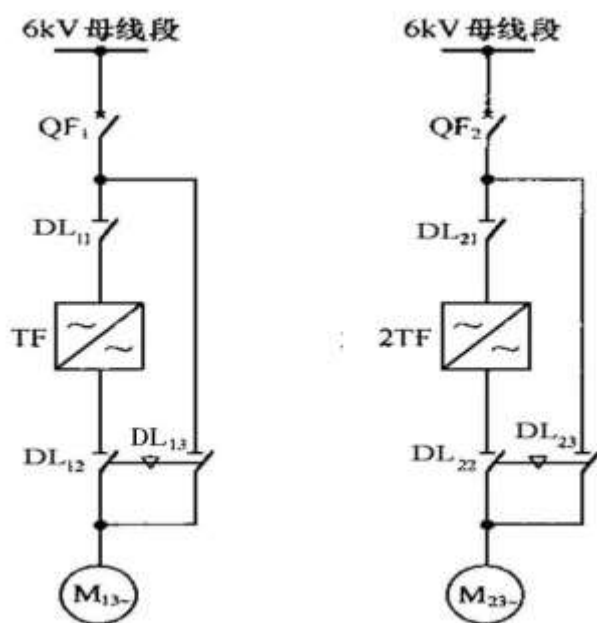


图 B.22 一拖一手动旁路图

送风机采用变频运行后，通常节能效果在 30%以上。系统控制特性也得到明显改善。其特点如下：

- a) 送风机变频改造后，电动机实现了降压降频起动，降低了电动机的故障率，减小了对电网的电流冲击；
- b) 运行中，风门全开，实现自动化调节风量，节电效果显著，并减小维护工作量；
- c) 当采用电压型变频器时，提高了网侧功率因数，达 0.95。工频运行时，仅为 0.85 左右，减少了网损；
- d) 当变频器故障时，电动机可投入工频运行，保证了机组的安全运行。

B.1.8.2 转炉除尘风机变频应用

钢厂转炉炼钢过程中，会产生大量的烟气。采用除尘风机把烟气吸入到烟气处理设备中，进行处理，然后再排入大气中。

在一个吹炼周期中，对除尘风机风量的要求是变化的，如图 B.23 所示。其中，A~B 为装料时间；B~C 为加大风量时间；C~D 为吹氧时间；D 点开始减小风量；D~E 为倒炉测温采样时间；E~F 为出钢时间；F~G 为溅渣时间。

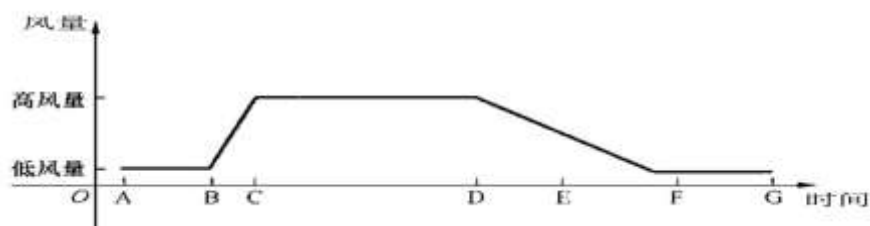


图 B.23 除尘风机的风量

图中对风量变化的要求，如果采用挡板调节，会造成很大的能源浪费。

应用变频调速技术，通过改变电动机转速来调节风量，既能满足风量变化的要求，又能经济运行，一般可节电达 30%~40%。

B.1.8.3 恒压供水泵变频调速控制

供水泵站是把已经处理好的清水经水泵加压后，输送到需要用水的地方。采用变频调速后，可以满足用户端用水量变化而又能保持其供水压力不变。实现了优化供水、节约用电的目标。

用变频调速实现恒压供水一般采用闭环控制（见图 B.20），控制对象为供水压力。

稳态运行，水泵供水能力与用户的用水量需求处于平衡状态，供水压力稳定为某设定值。反馈压力信号与给定压力信号近乎相等，PID 的调节器输出为零，电动机在其恒定频率下匀速运行，满足供水压力要求。

当用户用水量增大，供水压力下降，反馈压力信号减小，给定压力信号不变，合成信号则增大，PID 调节器产生正的调节量，使变频器输出频率增加、电动机转速升高，供水流量增大，水压力恢复，维持不变。反之，当用户的用水量减小，供水压力增大，给定压力信号不变，反馈压力信号增大，PID 调节器产生负的调节量，使变频器输出频率降低、电动机转速下降，恢复水压。

恒压供水系统采用变频调速，其节电率至少能达到 20%左右。

B.2 串级调速的基本原理

在绕线型异步电动机转子回路中，加入与转子转差电动势同频率的电压，可以调节其转速。如果把转差电动势变为直流电动势，同时把转子外加电压也变为直流量（即频率为零），同样能满足同频率的要求，这就是串级调速的基本思路。

图 B.24 是绕线型异步电动机串级调速框图。图中的整流桥把电动机转子的转差电动势、电流变成直流，逆变器的作用是给电机转子回路提供直流电动势，同时给转子电流提供通路，并把转差功率（扣除转子绕组铜损耗）大部分反送回交流电源。

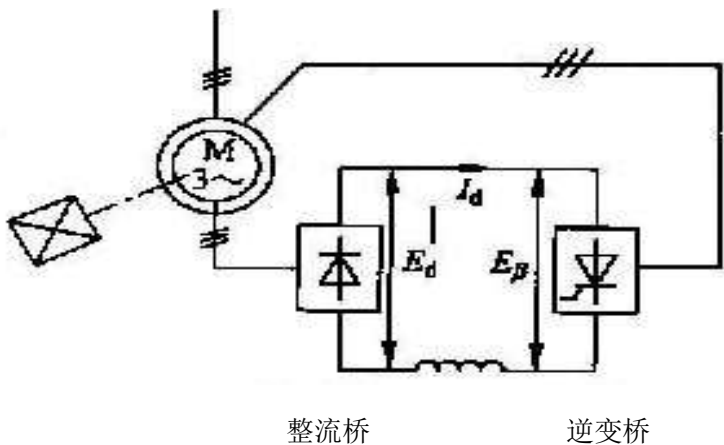


图 B.24 绕线型异步电动机串级调速框图

异步电动机转子相电动势 $E_{2s} = sE_2$ 。 E_{2s} 经三相整流桥后变为直流电动势 E_d

$$E_d = k_1 E_{2s} \dots\dots\dots (B. 13)$$

式中:

E_d ——直流电动势, 单位为伏 (V);

k_1 ——整流系数;

E_{2s} ——绕线型电机转子转差电动势, 单位为伏 (V)。

逆变桥直流侧直流电动势 E_β 为

$$E_\beta = k_2 U_2 \cos \beta \dots\dots\dots (B. 14)$$

式中:

E_β ——逆变桥直流侧直流电动势, 单位为伏 (V);

k_2 ——逆变桥的系数;

U_2 ——逆变桥交流侧电压, 单位为伏 (V);

β ——逆变角。

直流回路电流 I_d (见图 B. 24) 为

$$I_d = (E_d - E_\beta) / R \dots\dots\dots (B. 15)$$

式中:

R ——直流回路等效电阻。

上式可写为

$$E_d = E_\beta + I_d R \dots\dots\dots (B. 16)$$

因 R 较小, 可忽略不计, 上式变为

$$E_d = E_\beta = k_1 s E_2 = k_2 U_2 \cos \beta \dots\dots\dots (B. 17)$$

当整流桥、逆变桥都为三相桥式电路时, $k_1 = k_2$, 得转差率 s 为

$$s = \frac{U_2}{E_2} \cos \beta \dots\dots\dots (B. 18)$$

从上式看出, 改变逆变角 β 的大小, 就能改变电动机的转差率 s 。 β 角增大, s 减小, 它们之间的关系符合余弦规律。

这种调速方法适合于高电压、大容量绕线型异步电动机拖动风机、泵类负载等对调速要求不高的场合。

绕线型异步电动机运行时输入的有功功率为 P_1 , 减去定子铜损耗 P_{Cu1} 和铁损耗 P_{Fe} 后, 为电磁功率 P_M 。 P_M 中, 一部分转换为机械功率 $P_m = (1-s)P_M$; 一部分为转差功率 $P_s = sP_M$ 。转差功率 P_s 中, 一部分消耗在转子电阻中, 即 p_{cu2} ; 另一部分功率为 $(P_s - p_{cu2})$ 送入整流桥。再减去整流桥、逆变桥、电抗器等的损耗 p_B , 就是回馈给交流电网的功率 P_B ,

即 $P_B = p_s - p_{Cu2} - p_B$ 。

电网送给异步电动机的功率为 P ， $P = P_1 - P_B$ ；电动机输出的功率为 P_2 ，

$P_2 = P_m - p_m - p_a$ ，其中 p_m 为机械损耗， p_a 为附加损耗。

总效率 η 为

$$\eta = \frac{P_2}{P} \times 100\% \dots\dots\dots (B. 19)$$

图 B. 25 是绕线型异步电动机串级调速功率流程图。电动机在低速运行时，转差功率 P_s 较大，采用串级调速，能把其中大部分功率，通过图 B. 25 逆变桥输出接到电动机定子上的第二套绕组，回馈给电源。因此，总效率较高。可见，用于串级调速的绕线型异步电动机，其定子上有两套绕组：一为主绕组；一为反馈绕组。其中反馈绕组通过主绕组把功率 P_B 反送回电源。

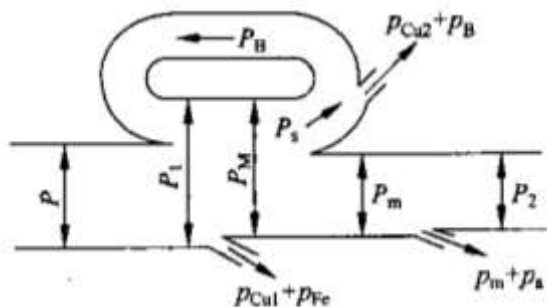


图 B. 25 绕线型异步电动机串级调速的功率流程图

B. 3 笼型三相异步电动机变极对数调速

异步电动机旋转磁动势的同步转速 n_1 ，与电机极对数 p 成反比。改变笼型三相异步电动机定子绕组的极对数 p ，就改变了同步转速 n_1 ，实现变极调速。

改变定子绕组的接线方式，就能改变其极对数。

图 B. 26 所示为三相异步电动机定子绕组接线及产生的磁极数，只画出了 A 相绕组的情况。每相绕组为两个等效集中线圈正向串联，例如 AX 绕组为 a_1x_1 与 a_2x_2 头尾串联，如图 B. 26 (a) 所示。因此，由 AX 绕组产生的磁极数为 4 极，如图 B. 26 (b) 所示。三相绕组的磁极数则仍为 4 极，即为 4 极异步电动机。

如果把图 B. 26 (a) 中的接线方式改变一下，每相绕组不再是两个线圈头尾串联，而变为两个线圈尾尾串联，即 A 相绕组 AX 为 a_1x_1 与 a_2x_2 反向串联，如图 B. 27 (a) 所示；或者，每相绕组两个线圈变为头尾串联后再并联，即 AX 为 a_1x_1 与 a_2x_2 反向并联，如图 B. 27 (b) 所示。改变后的两种接线方式，A 相绕组产生的磁极数都是 2 极，如图 B. 27 (c) 所示。三相绕组的磁极数也是 2 极，即为 2 极异步电动机。

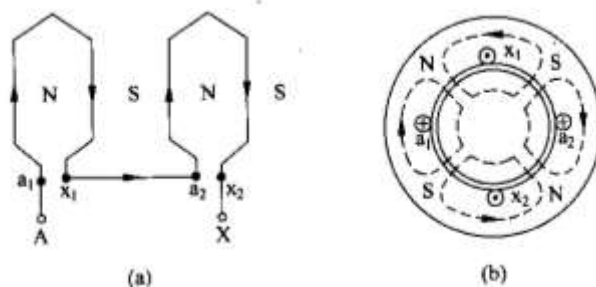


图 B. 26 三相异步电动机 A 相定子绕组接线及产生的磁极数 ($2p=4$)

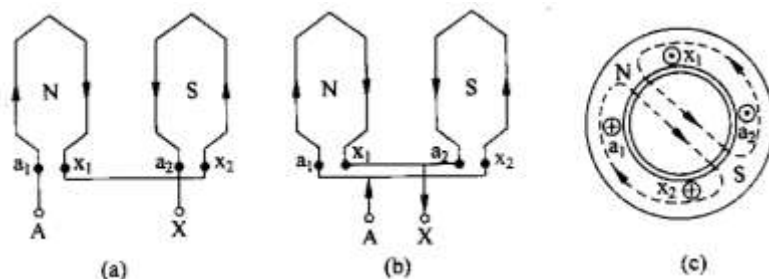


图 B. 27 三相异步电动机 A 相定子绕组接线及产生的磁极数 ($2p=2$)

从上面分析看出，三相笼型异步电动机的定子绕组，若把每相绕组中一半线圈的电流改变方向，即半相绕组反向，则电动机的极数便成倍变化。因此，同步转速 n 也成倍变化。

笼型异步电动机转子磁极数决定于定子的磁极数，变极运行时，不必进行任何改动。

绕线型异步电动机转子极数不能自动随定子极数变化，如果同时改变定、转子绕组极数又很麻烦，因此不采用变极调速。

以上仅简单叙述变极原理，实际的双速乃至多速电机要复杂得多，这里不再叙述。

B. 4 开关磁阻电机系统运行原理

开关磁阻电机调速系统由四部分组成：开关磁阻电机；功率变换器；检测器（包括电流检测和位置检测）和控制器，如图 B. 28 所示。

我们知道，磁路中磁通总是要沿着磁阻最小的路径闭合，不然就会对导磁体产生磁拉力或形成转矩。因此，设计开关磁阻电机时，应让它的定、转子都为凸极式，且二者的极数不相等，这样，才能使转子旋转时，定、转子之间磁阻变化大，产生所需要的电磁转矩。

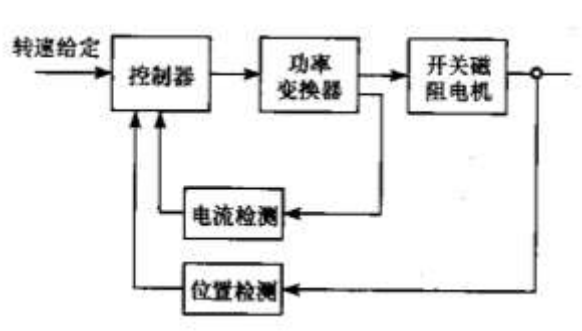


图 B. 28 开关磁阻电机调速系统

图 B. 29 是定子为 8 极，转子为 6 极的开关磁阻电机。在定子每个凸极上套上一个集中绕组，并把在直径方向相对应的两个凸极上的绕组串联在一起，组成电路的一相。如果通以电流，便在磁路中产生磁通。可见，图 B. 29 为四相（8/6 极）开关磁阻电机。图中仅画了 A 相的供电电源，B、C 和 D 相的，未画出。此外，还可设计为单相、两相、三相以及多相关开关磁阻电机。一般来说，小功率家用电器多用单相或两相式的，工业应用中，多用三相或多相式的。

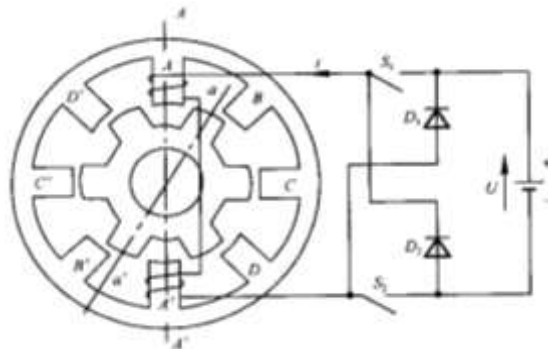


图 B. 29 A 相通电

从图 B. 29 中看出，在图示瞬间，定子 A 相磁极轴线 AA' 与转子磁极轴线 aa' 不重合，这时闭合开关 S_1 、 S_2 ，A 相绕组有电流（B、C 和 D 相断电），产生的磁通经定子磁轭、定子磁极、气隙、转子磁极和转子磁轭闭合。由于这种位置磁通遇到的磁阻不是最小，必然产生磁拉力（转矩）使转子逆时针方向旋转，直到 AA' 轴线与 aa' 轴线重合时，磁拉力消失，处于平衡状态。之后，依次接通 B、C 和 D 相绕组电流，转子则继续逆时针方向旋转。

开关磁阻电机的优点如下：

- a) 结构简单，容易制造，成本低廉；
- b) 运行效率高；
- c) 功率变换器中不会发生功率器件直通，可靠性高；
- d) 起动电流小，起动转矩大；
- e) 在宽调速范围内都具有高效率；
- f) 能四象限运行。

B. 5 无换向器同步电动机调速

在同步电动机调速系统中，根据电源输入频率控制方式不同，可以分为他控式和自控式两种。

他控式同步电动机的转速 n_1 ，由电源频率 f_1 和电机的极对数 p 决定，即 $n_1 = 60f_1/p$ 。一般采用开环控制，运行中存在转子振荡及失步问题。

自控式同步电动机的特点是，运行时，供电频率不是由外部给定，而是由电动机转子的转速来控制。一般在电动机转子上安装磁极位置检测器，用检测出的位置信号，控制逆变器中开关器件的开通与关断。即转子转速与变频电源的输出频率总是协调变化，所以叫自控式。

这种电动机不存在转子失步问题。

自控式同步电动机，根据所用变频器的种类，可以分为交直交变频同步电动机和交交变频同步电动机。前者亦称为无换向器同步电机调速系统。

无换向器同步电动机调速系统是由交直交变频器、同步电动机、转子磁极位置检测器组合而成的，如图 B. 30 所示。其中交直交变频器将电源的固定频率电压整为直流，再由逆变器转变为可变频率和电压的电源。

根据转子磁极位置检测器发出的电信号，控制逆变器中 6 个开关器件的开通与关断，从而控制了电机定子三相绕组的通电与断开，也就是控制了逆变器的输出频率。即同步电动机根据逆变器的频率产生同步转速，它的转速反过来又控制了逆变器的工作频率。

逆变器采用三相六拍导通方式，每一瞬间都有两相绕组同时通电，另一相不通电，每经过 60° 时间电角度，进行一次换相。三相绕组通电次序为：AB $\rightarrow$ AC $\rightarrow$ BC $\rightarrow$ BA $\rightarrow$ CA $\rightarrow$ CB $\rightarrow$ AB，三相相电流波形如图 B. 31 所示。

从图 B. 31 可见，每相绕组通电 120° 电角度后，断电 60° ，再反方向通电 120° 。每个开关器件在一个周期内通电 120° ，其余为关断。同一时刻有两个开关器件同时通电，每隔 60° 切换一个开关器件。开关器件开通次序为 A $\rightarrow$ Z $\rightarrow$ B $\rightarrow$ X $\rightarrow$ C $\rightarrow$ Y。

以 A 相绕组通电 120° 时间间隔为例，分析定子绕组产生的磁动势情况。

a) $0^\circ \sim 60^\circ$ 时间内

这时 A、B 两相绕组通电，逆变器中 A 和 Y 管导通，其余管子关断，见图 B. 30。图 B. 32 (a) 表示定子绕组中通入电流时，定子绕组磁动势产生的磁力线分布图形。

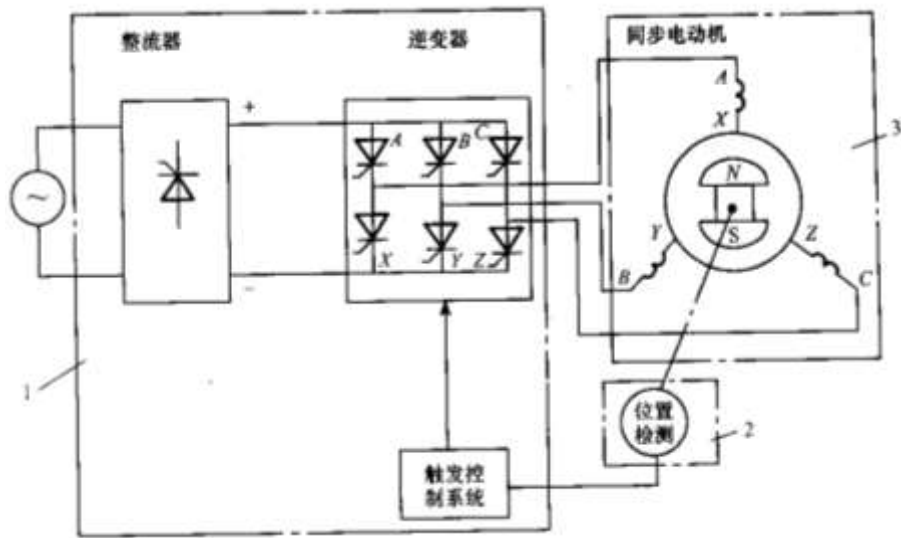


图 B. 30 无换向器同步电动机调速系统

1—变频器 2—转子位置检测器 3—同步电动机

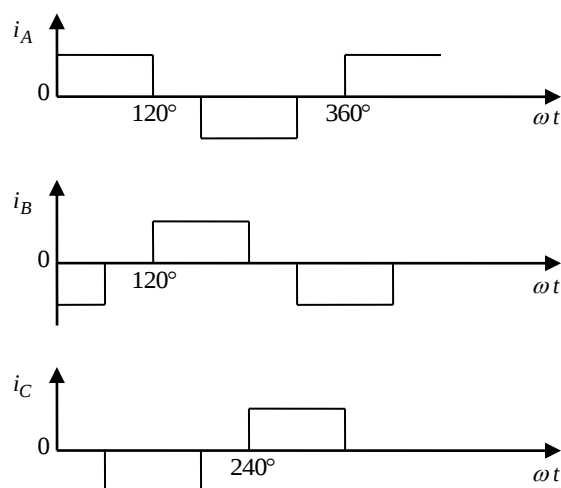


图 B.31 三相相电流波形图

从图 B.32 (a) 看出，在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时间内，由于 A、B 相通入了幅值不变的直流电，定子绕组产生的磁动势大小不变，产生的磁力线方向也不变。

b) $60^\circ \sim 120^\circ$ 时间内

这时 A、C 两相绕组通电，A 和 Z 两管导通，其余管子关断，见图 B.30。图 B.32 (b) 表示这时绕组通电及绕组磁动势产生的磁力线分布图形。

可以看到，由于通电相更换，定子绕组磁动势的大小仍然不变，但磁力线分布的方向却改变了，按逆时针方向转过了空间 60° 电角度。也就是说，在 60° 时间内，定子绕组磁动势的大小和方向不变，时间每隔 60° 电角度，切换一个管子导通，绕组的通电相改变时，定子绕组磁动势虽然大小不变，但方向则在空间转过了 60° 电角度。由此可知，按照三相六拍方式供电，定子绕组将产生步进式的旋转磁动势。

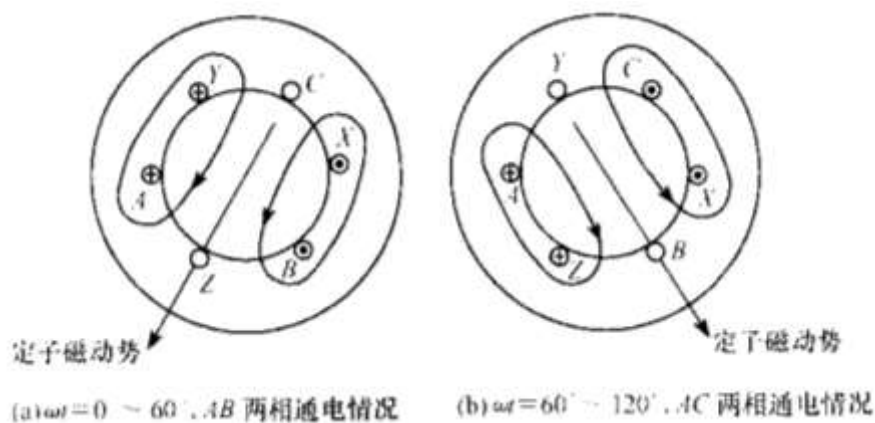


图 B.32 定子磁动势

同步电机转子上有 N、S 极，它与定子绕组磁动势相互作用会产生电磁转矩 T ，带动电机转动。为了使电磁转矩 T 具有恒定方向，且能得到最大值，要求转子位置与定子磁动势有一定的配合。其特点为，转子是连续转动的，而定子磁动势是步进式的，如何才能得到最大

的电磁转矩呢？根据同步电机的转矩公式

$$T = K_T F_a F_f \sin \delta \cdots \cdots \cdots (B. 20)$$

式中：

T ——电磁转矩，单位为牛·米（ $N \cdot m$ ）；

K_T ——转矩系数；

F_a ——定子磁动势幅值，单位为安（A）；

F_f ——转子磁动势幅值，单位为安（A）；

δ ——两个磁动势之间的夹角。

由于转子磁动势 F_a 与 F_f 随转子连续转动， F_a 隔 60° 时间电角度跳跃一次，可见，其夹角 δ 是变化的。为了获得电磁转矩 T 最大，希望 $\sin \delta$ 最大， δ 应在 $120^\circ \sim 60^\circ$ 范围变化。

δ 随时间变化，使电机电磁转矩 T 的大小也随时间变化，即有脉动。

这种电机具有与直流电动机相类似的机械特性。通过改变定、转子磁动势，来达到调速的目的。逆变器中开关器件的导通、关断，与直流电机电枢元件的换向作用相似，所以把这种电机称为无换向器电机（即无机械式换向器）。

附录 C

（资料性附录）

电机系统设计的技术经济比较

C.1 概述

使用高效电动机、变频调速器等节能设备对终端用户将产生两个方面的影响，一是购置成本的上升，二是使用成本的下降。通常，节能设备因使用新的工艺、新技术或新材料，其制造成本比一般设备高。节能设备所节约电费能不能弥补制造成本的增加，需通过设备的寿命周期成本和投资回收期分析来判断。

C.2 设备寿命周期成本

设备的寿命周期成本（LCC）是指在一定使用期间内因使用产品而消费的总费用。这个总费用包括了从购买设备到该产品使用结束整个期间该设备所花费的全部费用，主要包括购置设备费用、安装调试费用、维护检修费用、能源消耗费用等。寿命周期成本可分为初始安装成本（PC）和使用成本（OC），安装成本（PC）包括设备购置费、安装调试费等；使用成本（OC）包括维护检修费和能源消耗费等。

在选择不同节能设备时应对各种方案进行寿命周期成本分析，选取寿命周期成本最低的方案。寿命周期成本的计算公式为

$$LCC = PC + \sum_{t=1}^N \frac{OC_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

LCC —— 寿命周期成本，单位为元；

PC —— 初始安装成本，单位为元；

N —— 统计年数；

OC_t —— 第 t 年的使用成本，单位为元；

r —— 折现率。

C.3 回收期

回收期（PAY）是指通过降低使用成本（ ΔOC ），来抵消在购买高能效产品时需增加成本的时间。它是衡量节能经济效果的一个重要指标，回收期越短说明经济效果越好，回收期越长说明经济效果越差。计算回收期的公式为

$$PAY = - \frac{\Delta PC}{\Delta EC} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

PAY —— 回收期，单位为年；

ΔPC —— 购买成本增加值，单位为元；

ΔEC —— 每年节约的电费，单位为每年元。

附录 D

(资料性附录)

风机的类型与特性

D.1 风机的分类

D.1.1 风机是一类将原动机所做的功转换为被输送气体的压力势能和动能的流体机械。

D.1.2 按工作压力分类

按工作时产生压力的大小，风机可分为：

- a) 通风机：小于 15 kPa；
- b) 鼓风机：15~340 kPa；
- c) 压缩机：大于 340 kPa。

按工作时产生压力的大小，风机又可分为（在大气压为 101.3 kPa，气温为 20 °C 的标准状态下）：

- a) 低压离心通风机：小于 1 kPa；
- b) 中压离心通风机：1~3 kPa；
- c) 高压离心通风机：3~15 kPa；
- d) 低压轴流通风机：不超过 500 Pa；
- e) 高压轴流通风机：高于 500 Pa，但低于 5 kPa。

D.1.3 按工作原理分类

按工作原理，风机可分为叶片式、容积式和喷射式三种类型。

D.2 风机的基本性能参数

D.2.1 风机的主要性能参数

风机的主要参数有流量、通风机压力、功率、效率及转速等。

C.2.1.1 流量

风机单位时间内在出口截面所输送的流体量称为流量。通常使用的有体积流量与质量流量两种。体积流量用符号 q_v 表示，单位为 m^3/s 、 m^3/min 或 m^3/h 。质量流量用符号 q_m 表示，单位为 kg/s 、 kg/min 或 kg/h 。在无特殊说明时， q_v 是指在标准进口状态下（压力 $p=101.3\times10^4$ Pa，温度 $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 50%，气体密度 $\rho=1.2\text{ kg}/\text{m}^3$ ）气体的体积。

D.2.1.2 通风机压力

通风机压力指单位体积的气体在风机内所获得的能量，即风机出口截面高于进口截面的机械能，用符号 p 表示，单位为 Pa。

D.2.1.3 功率

风机的功率一般包括轴功率、有效功率、内功率与原动机功率。

D.2.1.3.1 轴功率

原动机供给风机轴的机械功率称为轴功率，亦称风机的输入功率，用符号 P 表示，单位为 kW。

D.2.1.3.2 有效功率

气体从风机中实际得到的功率称为有效功率。相应的这部分能量被流出风机的气体所携带，因此也称输出功率。

风机的有效功率为

$$P_e = q_v p / 1000 \dots\dots\dots (D.1)$$

$$P_e = P \eta \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

P_e ——风机有效功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

P ——风机轴功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

η ——风机总效率。

D.2.1.3.3 风机内功率

风机的内功率是风机转子实际传递给气体的功率。内功率与有效功率的关系为

$$P_i = P_e + \Delta P_i \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

P_i ——风机内功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

ΔP_i ——风机内部损失功率的数值，单位为千瓦 (kW)。

风机的轴功率 P 等于内功率 P_i 与轴承、轴端密封摩擦损失功率之和。

D.2.1.3.4 原动机功率

风机在运转时，其原动机的输入功率为

$$P_g' = P_e / \eta \eta_d \eta_g \dots\dots\dots (D.4)$$

原动机的输出功率为

$$P_g = P_e / \eta \eta_d \dots\dots\dots (D.5)$$

原动机的功率应为

$$P_M = K P_e / \eta \eta_d \eta_g \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：

P_g' ——原动机输入功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

P_g ——原动机输出功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

P_M ——原动机功率的数值，单位为千瓦 (kW)；

η_d ——传动效率的数值；

η_g ——原动机效率的数值；

K ——电动机容量安全系数的数值。

电动机容量安全系数 K 的数值可查表 D.1。

表 D.1 电动机容量安全系数

电动机功率 kW	K 值			
	离心式			轴流式
	一般用途	灰尘	高温	
<0.5	1.5	—	—	—
0.5~1	1.4	—	—	—
1.0~2.0	1.3	—	—	—
2.0~5.0	1.2	—	—	—
>5.0	1.15	1.2	1.3	1.05~1.1

D.2.1.4 效率

风机在工作时产生机械损失、容积损失和流动损失，这些损失的大小可分别用机械效率、容积效率和流动效率来衡量。

D.2.1.4.1 机械损失与机械效率

机械损失包括轴与轴承的摩擦损失、轴与轴端密封的摩擦损失及叶轮圆盘的摩擦损失。

轴与轴承、轴端密封的摩擦损失与轴承的型式、轴端密封的型式和结构有关。该功率损失不大，约占风机轴功率 P 的 1%~5%。

叶轮圆盘摩擦损失与腔室形状、表面粗糙度、雷诺数及叶轮的宽度、叶轮流道宽度等因素有关。

机械效率为：

$$\eta_m = \frac{P - \Delta P_m}{P} \times 100\% \dots\dots\dots (D.7)$$

式中：

η_m ——机械效率的数值；

ΔP_m ——机械损失功率的数值。

D.2.1.4.2 容积损失与容积效率

从高压区通过旋转与静止部件间的间隙流入低压区的气体，在叶轮中获得的能量消耗在流动的阻力上，这种能量损失称为容积损失，用 ΔP_v 表示。容积损失的大小，用容积效率 η_v 表示。

离心风机的容积损失是由于泄漏所引起的。泄漏主要发生在：

- 叶轮入口处的密封间隙；
- 平衡轴向力装置的间隙；
- 导叶隔板与轴（轴套）间隙（它不属于容积损失，但习惯上归入容积损失来分析）；
- 轴端密封间隙。

为提高风机的容积效率，一般可采取减小泄漏面积 A 和增大密封间隙的阻力等方法来减少泄漏量。

D.2.1.4.3 流动损失与流动效率

气体从风机进口流至出口的过程中会遇到流动阻力，产生流动阻力损失。流动阻力损失有：摩擦阻力和局部阻力损失，工况变化时的冲击损失。

气体在吸入部分、叶轮流道、导叶及压出部分的流动过程中，因气体的粘性而产生沿程阻力损失。气体在风机中流动时，遇到转弯、截面积变化造成气体边界层分离，产生旋涡和二次流。气体运动速度的大小与方向的变化所产生的损失，称为局部阻力损失。

冲击损失一般在风机工作于非设计工况时产生。风机在设计工况下运转时，气体流入角与叶片进口安装角一致，无冲击损失；若容积流量小于设计值，则气体会冲击在叶片的工作面或非工作面上，从而产生旋涡。

风机在非设计工况下工作，在叶轮出口处的气体运动方向也发生变化，叶轮出口也会产生气体的冲击，造成冲击、旋涡损失。

流动损失比机械损失和容积损失大。流动损失的大小，用流动效率 η_h 表示。

D.2.1.4.4 风机的总效率

风机的总效率为

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{P_e}{P - \Delta P_m - \Delta P_v} \cdot \frac{P - \Delta P_m - \Delta P_v}{P - \Delta P_m} \cdot \frac{P - \Delta P_m}{P} = \eta_h \eta_v \eta_m \dots \dots \dots (D.8)$$

离心风机的总效率 η 随容量、型式、结构而异，其值约为 70%~90%。

风机的总效率与内效率的最大值，不一定同在一个工况点上，其最高效率区也不一定一致。因此，风机的总效率用作风机的经济性指标之一，而风机的内效率用作风机相似设计和相似换算的依据。

D.2.1.5 转速

风机转轴每分钟的转数称为转速，用 n 表示，单位为 r/min。

D.2.2 风机叶轮参数

D.2.2.1 叶轮几何参数

叶轮几何参数包括

D_2 ——叶轮叶片出口外径；

b_2 ——叶轮叶片出口宽度；

b_1 ——叶轮叶片进口宽度；

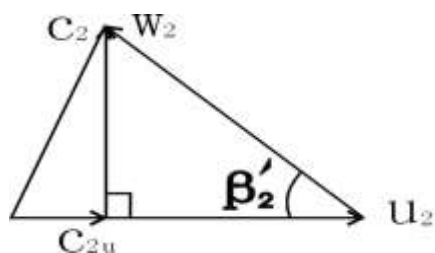
D_1 ——叶轮叶片进口直径；

β_1 ——叶轮叶片进口角；

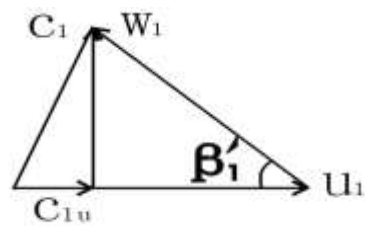
β_2 ——叶轮叶片出口角。

D.2.2.2 叶轮叶片进出口速度三角型

叶片进出口流体切向速度、相对速度和绝对速度形成的三角形称为进、出口速度三角形，如图 D.1 所示。



(a) 出口速度三角形



(b) 进口速度三角形

图 D.1 叶轮叶片进出口速度三角型

C_2 ——叶片出口流体的绝对速度；

U_2 ——叶片出口流体的切向速度；

W_2 ——叶片出口流体的相对速度；

β'_1 ——叶片出口流体的流出角；

C_{2u} ——叶片出口流体绝对速度在切向的投影分速度；

C_1 ——叶片进口流体的绝对速度；

U_1 ——叶片进口流体的切向速度；

W_1 ——叶片进口流体的相对速度；

β'_2 ——叶片进口流体的流入角；

C_{1u} ——叶片进口流体绝对速度在切向的投影分速度。

D.2.3 离心风机叶轮参数与性能的关系

表 D.2 给出了离心风机叶轮参数与性能的关系。

表 D.2 离心风机叶轮参数及其比较

型式	前向		径向		后向	
出口安装角 β_2	$>90^\circ$		90°		$<90^\circ$	
C_{2u}	$>u_2$		$=u_2$		$<u_2$	
理论压力	大		中		小	
动压	$>$ 静压		$=$ 静压		$<$ 静压	
	多叶	窄轮	直板	弯板	单板	机翼
流量系数 Q	0.3~0.6	0.05~0.3	0.1~0.3	0.05~0.2	0.05~0.35	0.1~0.35
压力系数 p	0.9~1.2	0.7~0.9	0.55~0.75	0.55~0.75	0.3~0.6	0.3~0.6
内部效率 η_i	0.6~0.78	0.7~0.88	0.7~0.88	0.7~0.88	0.75~0.9	0.75~0.92
b_2/D_2	0.3~0.6	0.05~0.3	0.1~0.3	0.05~0.2	0.05~0.35	0.1~0.35
比转速 n_s	50~100	10~50	30~60	25~50	40~80	50~80
特性及适用范围	体积小, 转速低, 噪声低,	转速高, 压力高, 噪声	叶片简单, 转速低, 适	转速高, 适用于冶金、	效率较高, 噪声较小, 适用于锅炉、空调、矿井、建筑	

表 D.2 离心风机叶轮参数及其比较（续）

型式	前向		径向		后向	
	多叶	窄轮	直板	弯板	单板	机翼
特性及适用范围	适用于空调	高，适用于阻力大的系统	用于农机和排尘系统	排尘和烧结	通风等	
注： c_{2u} ——叶轮叶片出口处的绝对流速在周向的分速度。 u_2 ——叶轮叶片出口处的圆周速度。 b_2 ——叶轮叶片出口宽度。 D_2 ——叶轮叶片的外径。						

D.3 风机的性能曲线

风机的性能曲线表示为在一定的进口条件和转速时，通风机压力 p 、轴功率 P 、效率 η 与流量 q_v 之间的关系曲线称为风机性能曲线

风机内部的损失难以精确计算，因此其性能曲线难以用理论方法精确绘制，通常用试验方法测出。

风机性能曲线的横坐标为流量 q_v ，纵坐标为通风机压力 p 、轴功率 P 和风机效率 η 。典型的风机性能曲线如图 D.2 所示。

D.3.1 离心式风机的性能曲线

离心式风机的 p - q_v 曲线形状有三类，如图 D.3 所示。曲线 I 形状较平坦，流量变化较大时，压力变化较小。当要求流量在较大范围内变化，而在小流量时可节能，也可选择有平坦 p - q_v 曲线的风机。曲线 II 为陡降的性能曲线，即流量变化不大，而压力变化较大。曲线 III 是具有驼峰状的曲线。这种曲线在上升段工作是不稳定的。 p - q_v 曲线应不出现上升段或上升段的区域尽可能窄。

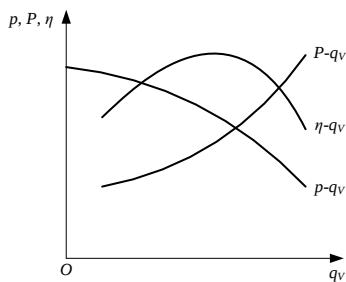


图 D.2 风机的性能曲线

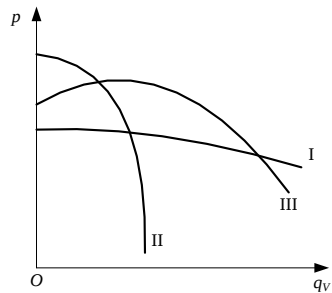


图 D.3 不同形状的 p - q_v 曲线

D.3.2 轴流式风机的性能曲线

D.3.2.1 轴流式风机的特点

轴流式风机的基本特点是流量大、压力低。

轴流式风机可分为动叶可调式、静叶可调和固定叶片式等结构型式。

动叶可调轴流式风机的特点是：

a) 与相同容量的离心式风机相比较, 其结构比较紧凑, 外形尺寸小, 重量轻。与同容量的离心式风机相比, 其空间尺寸可减少 30%。

b) 变工况经济性能好。动叶片安装角可随负荷变化而改变, 既可调节流量又可保持风机在高效区运行。在低负荷时, 其功耗低于离心式风机。

c) 转子结构较复杂, 转动部件多, 制造、安装精度要求高, 维护工作量较大。通过完善设计制造技术, 可提高动叶调节机构的可靠性, 减少维护工作量。

d) 噪声大, 可达 110~130 dB (A), 而离心式风机的噪声一般为 90~110 dB (A)。

D.3.2.2 轴流式风机的性能曲线

轴流式风机的性能曲线在叶轮转速和叶片安装角一定时测得, 如图 D.4 所示。其形状特点是:

a) $p-q_v$ 曲线在小流量区域内出现马鞍形形状, 在大流量区域内非常陡降, 在 $q_v=0$ 时 p 最大;

b) $P-q_v$ 曲线, 在 $q_v=0$ 时, P 最大, 随着 q_v 增大, P 减小, 因此轴流式风机不允许在空负荷时启动, 除非动叶可调;

c) $\eta-q_v$ 曲线, 高效区比较窄, 最高效率点接近不稳定分界点 c 。

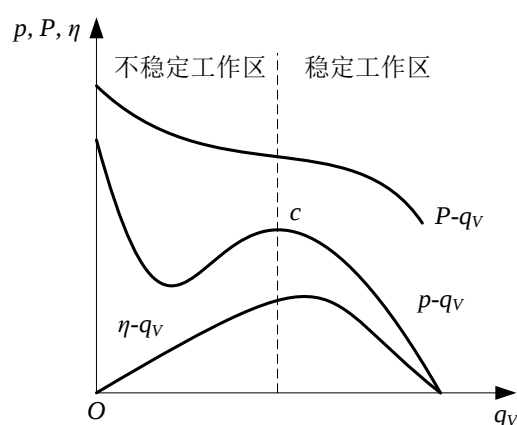


图 D.4 轴流式风机的性能曲线

轴流式风机的叶片安装角改变时, 其性能曲线也随之变化。在一定转速下, 把与各叶片安装角对应的性能曲线 (包括 $p-q_v$ 曲线、 $P-q_v$ 曲线和 $\eta-q_v$ 曲线) 绘制在同一张图上, 可得到轴流式风机的通用性能曲线。它表明: 运行中叶片安装角在一定范围内调整, 可扩大轴流风机的高效工作区。

D.3.3 无因次性能曲线

为选择、比较和设计风机, 可采用一系列无因次的参数, 作出无因次性能曲线。无因次性能曲线与计量单位、几何尺寸、转速、气体密度等因素无关, 使用方便, 在风机选型设计计算中应用尤为广泛。

对每一种型式的风机, 仅有一组无因次性能曲线。彼此相似的风机, 属于同一类型, 它们的无因次性能曲线只有一组。不同类型的风机, 有不同的无因次性能曲线。选择风机时,

可根据这些无因次性能曲线进行比较，择优选取。

D.4 风机的运行

供风系统运行时，应根据用户实际需求的供风量随时对风机进行合理的调度、控制，使供风量满足用户要求，并使风机处于优化运行状态。

确定风机的运行工况时，除了应考虑风机本身的特性，还应考虑管路的阻力特性。

D.4.1 管路性能曲线

风机性能曲线仅表示其自身的特性。在确定风机实际运行工作点时，还应知道管路性能曲线。这两个性能曲线的交点，是风机运行的工作点，也叫工况。

管路性能曲线是流体在管路系统中通过的流量与所需要的能量之间的关系曲线。管路性能曲线的形状与位置取决于管路结构、流体性质和流动阻力。风机的管路性能曲线如图 D.5 所示。

风机的管路用于输送气体。在管路入口压力为大气压，气体通过风机之后仍排入大气，或者风机前后两个容器的压力差很小时，管路性能曲线只取决于管路阻力损失，为通过坐标原点的二次抛物线，如图 D.5 中曲线 OC 所示。它表明：对于一定的管路系统，通过的流量越多，外界提供的能量应越大。

D.4.2 风机的工作点

风机实际运行时，应同时满足风机性能曲线和管路性能曲线。将某一转速下的两条曲线按同一比例绘于同一坐标图上，则二者的交点就是风机在该管路系统中运行的工作点，如图 D.6 所示。图中 $p-q_v$ 是风机性能曲线，曲线 1 是管路性能曲线，交点 A 是工作点。在工作点处运行时，所产生的能量等于管路系统输送这些流量所需要的能量。

通风机压力 p 表征的是风机的总能量。用于克服管路阻力的是其中的静压部分 p_{st} 。因此，有时还用静压性能曲线 $p_{st}-q_v$ 与管路性能曲线的交点 C 作为风机的静压工作点，如图 D.6 所示，其中风机压力性能曲线 $p-q_v$ 与管路性能曲线的交点 A 是风机压力工作点。

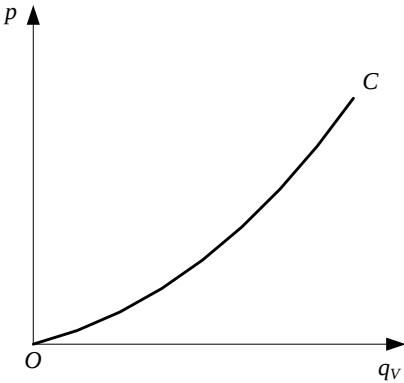


图 D.5 风机的管路性能曲线

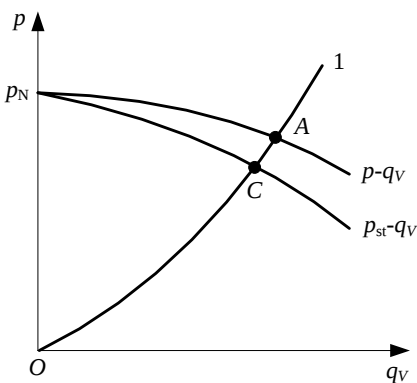


图 D.6 风机的工作点

D.4.3 风机的并联与串联运行

D.4.3.1 风机的并联运行

并联运行就是两台或两台以上风机同时向同一管路系统输送气体的工作方式。并联的主要目的是为了增加风机的流量，有时是为了应急而作为备用。

两台相同性能的风机向同一管路系统输送气体时，它们在运行时具有相同的压力，总流量应为同一压力两台风机的流量之和。如图 D.7 所示，曲线 I、II 为两台相同性能风机的性能曲线，曲线 R 为管路性能曲线。二者并联运行时，总性能曲线（I+II）应由两台风机的性能曲线在同一压力下的流量叠加而成，即在同一压力下将两台风机曲线的横坐标相加，即得风机并联的合成性能曲线。并联运行时，合成工作点为管路性能曲线 R 和合成性能曲线（I+II）的交点 A，相应的流量为 q_{VA} 。从 A 点作水平线，与每台风机的性能曲线（曲线 I、II）交于 A_I 点，该点可决定每台风机的流量 q_{VI} 或 q_{VII} ， $q_{VI}=q_{VII}=q_{VA}/2$ 。当一台风机单独在该系统工作时， A_s 为工作点， $q_{Vs}>q_{VI}$ ，即 $2q_{VI}=q_{VA}<2q_{Vs}$ 。因此，并联运行时，虽然各风机的总流量大于一台风机单独运行时的流量，但每台风机的流量小于它单独运行时的流量，即总流量小于各风机分别单独在同一系统中工作时的流量之和，其主要原因是并联之后流量增大，管路阻力增加。并联的台数越多，流量增加的比例越少。

两台风机并联后，风机的总压力高于每台风机单独运行时的压力，其原因是并联运行时管路总流量增加，管路阻力增加，则需要的压力增加。同时，每台风机并联后的功率比它单独运行时减小了，其原因是功率随流量增加而增大，在较小流量下功率也较小。

风机的性能曲线越平坦，管路性能曲线越平坦，并联后的总流量增加得越多。反之亦然。

D.4.3.2 风机的串联运行

风机首尾相接串联在同一管路系统中，依次传送同一流量的工作方式称为风机串联运行。串联的主要目的是为了增加风机的压力。

多级风机实际上相当于几台单级风机串联运行。在需要提高扬程时，一般可采用多级风机。

在选择风机串联运行方式时，为避免因风机的额定流量不一致而使有些风机偏离高效区，应使参与串联运行的各风机的额定流量尽量一致，应尽量避免性能差别太大的风机串联运行。

性能相同的两台风机在同一管路系统中串联运行，其性能曲线分别如图 D.8 中曲线 I、II 所示，曲线 R 为管路性能曲线。串联运行风机系统的特点是：各台风机的流量相同，压力依次提高，因此，风机串联运行时的合成性能曲线（I+II）是在同一流量下将两台风机性能曲线对应工况点的压力相叠加而成，即在同一流量下将两台风机性能曲线的纵坐标相加，即得串联风机的合成性能曲线。串联运行时，合成工作点为管路性能曲线 R 和风机合成性能曲线（I+II）的交点 A，该点的压力为 p_A ，流量为 $q_{VA}=q_{VI}=q_{VII}$ 。从 A 点作垂直线，与每台风机的性能曲线（曲线 I、II）交于 A_I 点，该点可决定每台风机的压力 p_I 或 p_{II} ， $p_I=p_{II}=p_A/2$ 。当一台风机单独在该系统工作时， A_s 为工作点，该点的流量为 q_{Vs} ，压力为 p_s ， $p_s>p_I=p_{II}$ 。因此，串联运行时，虽然各风机的总压力高于一台风机单独运行时的压力，但每台风机的压力低于它单独运行时的压力，即总压力低于两台风机分别单独在同一系统中工作时的压力之

和。串联的台数越多，每台风机与它单独运行时相比，压力下降越多，总压力增加的比例越少。其原因是串联后工作点沿管路性能曲线移动，使串联的每一台风机的压力小于它单独工作时的压力，但总流量比单独工作时的的大。

管路性能曲线越陡峭，串联后压力增加越多。

串联运行时风机的压力逐级升高，工作在后面的风机应具有较高的强度，以免损坏。

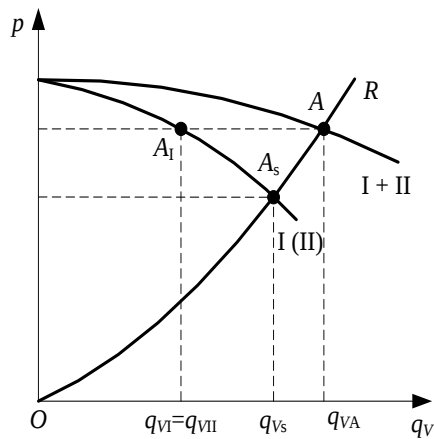


图 D.7 两台相同性能风机的并联运行

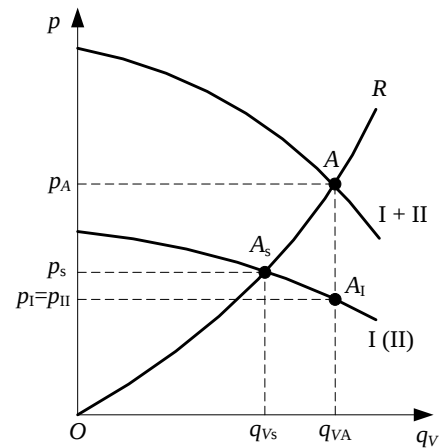


图 D.8 两台相同性能风机的串联运行

附录 E

（资料性附录）

泵的主要类型与特性

E.1 泵的分类

泵按工作原理分为两大类，即动力叶片式泵和容积式泵。容积式泵按工作室容积变化的方式又可以分为往复式泵和回转式泵两大类。在两大类中用得最多的是叶片式泵。通常将叶片式泵的流量、扬程和转速的关系称为比转速，比转速的计算公式如下。

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

n_s ——比转速，单位为转每分（r/min）；

n ——水泵转速，单位为转每分（r/min）；

Q ——流量，单位为 m^3/s 、 L/s 和 m^3/h 、 m^3/min ；

H ——扬程，液体柱高，单位为米（ m ）。

进行分类有低比转速泵、中比转速泵和高比转速泵。见表 E.1

表 E.1 泵的分类

泵型	比转速 n_s
离心泵	6~250
混流泵	250~500
轴流泵	500~1000

从比转速的关系式看到，低比转速泵性能特点是流量小，扬程高，满足这一性能的叶片泵是离心泵或者旋涡泵。

高比转速泵性能特点是流量大，扬程低，满足这一性能的叶片泵是轴流泵或贯流泵。

中比转速泵是介于离心泵和轴流泵之间的混流泵。

这三种叶片泵中离心泵是用量最大的泵类，几乎占 80%。

E.1.1 离心泵的性能特点

离心泵按性能又可分为低比转速离心泵、中比转速离心泵和高比转速离心泵。见表 E.2。

表 E.2 离心泵分类（按比转速分）

	低比转速	中比转速	高比转速
	23~80	80~150	150~300（250）
若转速为 2950 r/min； 流量为 25 L/s 的扬程范围	310~59	59~25.5	25.5~10.12

若转速为 2950 r/min; 流量为 25 L/s 的扬程范围	493~93.6	93.6~40.49	40.49~16
--------------------------------------	----------	------------	----------

离心泵的效率一般随比转速变化，比转速愈高效率愈高。通常消防、供水、化工流程、节水灌溉、矿井排水、空调循环冷却一般扬程都要求在 140 m 以上，因此只能选用中比转速以下离心泵。离心泵主要由离心力产生扬程，而离心力正比于叶轮的切向速度，也就正比于叶轮的直径，而叶轮的直径愈大，效率愈低。

在应用中为了满足所需要的扬程，可能采用低比转速离心泵或者为了提高效率也可采用中比转速多级离心泵。

离心泵的性能特点有：

- a) 扬程高、流量小，扬程—流量性能曲线，随流量增大扬程降低较缓慢，见图 E. 1 中扬程与流量关系曲线 ($H \sim Q$)。
- b) 相对于轴流和混流泵，泵的效率较低。
- c) 在小流量和零流量时泵的轴功率小，适用于关闭出口闸阀起动。

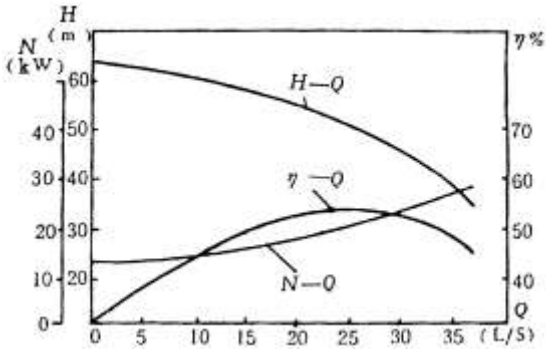


图 E. 1 离心泵性能曲线图

图 E. 1 中 $H \sim Q$ 为扬程与流量关系曲线； $N \sim Q$ 为功率与流量关系曲线； $\eta \sim Q$ 为效率与流量关系曲线。

E. 1. 2 轴流泵的性能特点

轴流泵的特点有：

- a) 扬程低、流量大，扬程—流量性能曲线随流量增大扬程降低快。
- b) 相对于离心泵，泵效率较高。
- c) 泵的轴功率在小流量和零流量时高，适于打开出口闸阀起动。
- d) 轴流泵的叶片角可调节，改变性能曲线，见图 E. 2。

轴流泵应用于需要扬程低流量大的的液体输送，如大型供水站、排水站，南水北调的泵站用水。

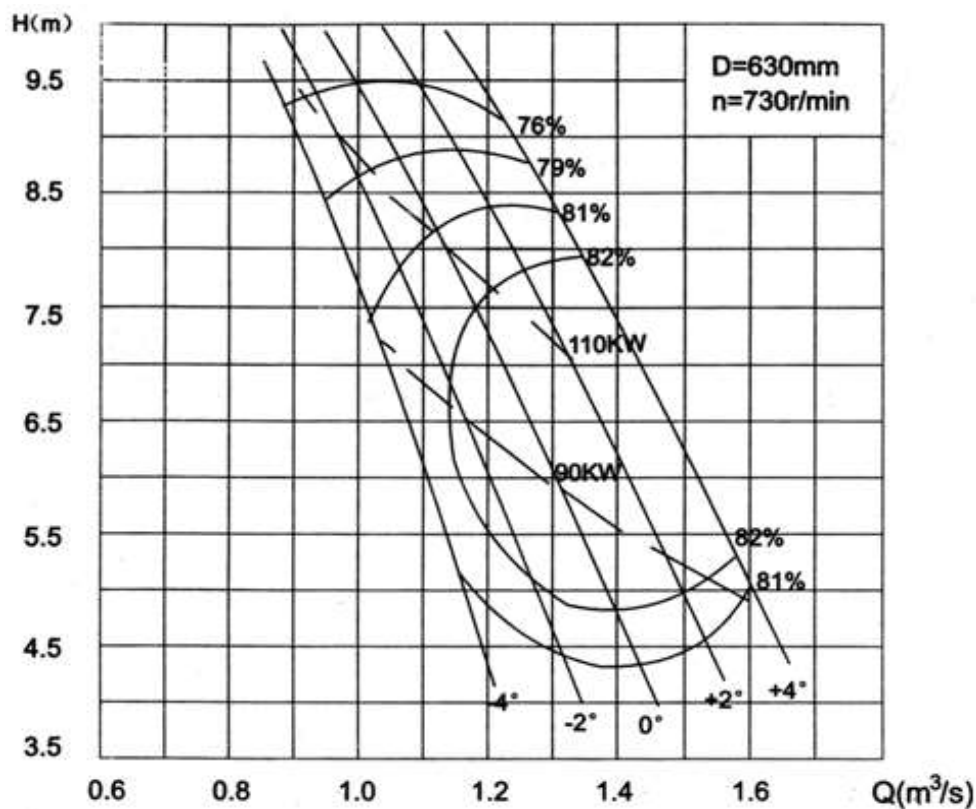


图 E.2 轴流泵性能曲线图

图E.2中，“——”为 $H \sim Q$ 扬程与流量关系曲线；“——”代表的是等功率曲线；“ $\sim$ ”代表为等效率曲线。）

E. 1.3 混流泵的性能特点

混流泵的特点有：

- 扬程、流量介于离心泵和轴流泵。
- 相对于离心泵，效率较高。

混流泵应用于扬程较高、流量大的场所，如电站冷却循环水泵、炼钢厂循环水泵、地下排水泵等。

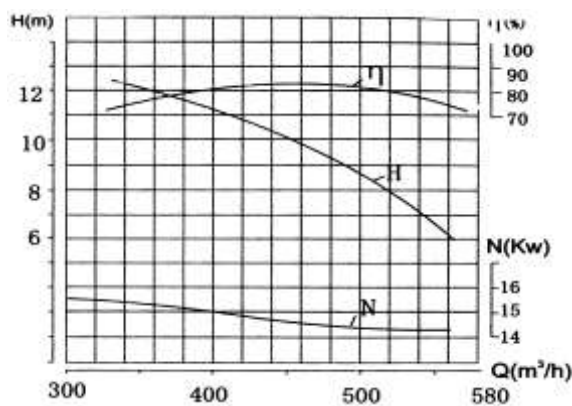


图 E.3 混流泵性能曲线

E. 2 输液管的沿程阻力损失和局部阻力损失计算式，泵系统的管网性能曲线

E. 2. 1 输液管的沿程阻力损失计算式

沿程水力摩擦阻力损失为

$$h_L = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (E. 2)$$

式中:

h_L ——输液管沿程阻力损失, 单位为米液体柱高 (m)

L ——输液管长, 单位为米 (m);

D ——输液管直径, 单位为米 (m);

λ ——输液管管材管壁粗糙度和管中速度有关的阻力系数;

V ——管中速度, 单位为米每秒 (m/s);

g ——重力加速度, 单位为米每秒平方 (m/s²)。

E. 2. 2 管路附件的局部阻力损失计算式

管网中各种管路附件局部阻力损失之和为

$$\Sigma h_\xi = \Sigma \xi \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (E. 3)$$

式中:

Σh_L ——管网中各种管路附件阻力损失, 单位为米液体柱 (m);

$\Sigma \xi$ ——管网中各种管路附件的阻力系数之和;

v ——输液管中速度, 单位为米每秒 (m/s);

g ——重力加速度, 单位为米每秒平方 (m/s²)。

E. 2. 3 泵系统管网的性能曲线

泵扬程的计算式为

$$H = Z + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \Sigma h_L + \Sigma h_\xi + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \dots\dots\dots (E. 4)$$

式中:

H ——将要选择泵必须满足的扬程, 单位为米液体柱 (m);

Z ——计划要求选择泵提升的位置高度 (即位置势能), 单位为米 (m);

p_1 ——泵进口要求的压力, 单位为 kgf/m²;

p_2 ——泵出口要求的压力, 单位为 kgf/m²;

Σh_L ——管网中输出段和吸入段输液沿程摩擦损失之和; 单位为米液体柱 (m);

Σh_ξ ——为管网中输出段和吸入段输液局部损失之和;

V_1 ——泵进口速度, 单位为米每秒 (m/s);

V_2 ——泵出口速度, 单位为米每秒 (m/s);

g ——重力加速度, 单位为米每秒平方 (m/s²);

γ ——输送液体重率，单位为 kgf/m^3 。

上式中的 Σh_L 、 Σh_ξ 、 $\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$ 分别可写成

$$\Sigma h_L = \Sigma \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = S_1 Q^2 \dots\dots\dots (\text{E. 5})$$

$$\Sigma h_\xi = \Sigma \delta \frac{V^2}{2g} = S_2 Q^2 \dots\dots\dots (\text{E. 6})$$

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = S_3 Q^2 \dots\dots\dots (\text{E. 7})$$

则

$$H = Z + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + S Q^2 \dots\dots\dots (\text{E. 8})$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \dots\dots\dots (\text{E. 9})$$

其中， S 、 S_1 、 S_2 、 S_3 为常系数。因此得到管网系统扬程与流量之间的函数式，绘成曲线如图，通常称为管网的系统性能曲线，即管网所需扬程与流量之间的关系曲线，如图 E. 4 所示。

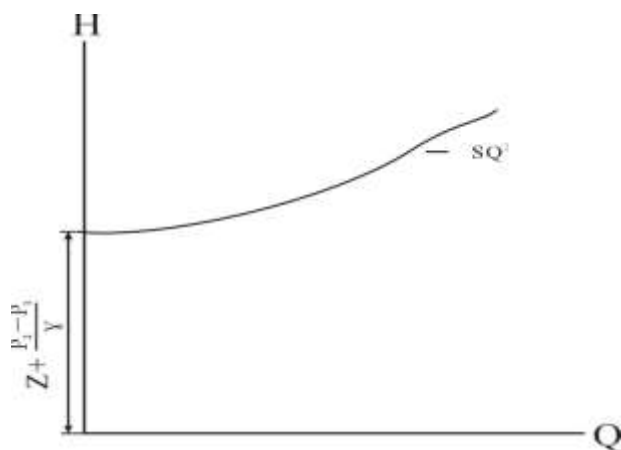


图 E. 4 管网的系统性能曲线

E. 3 泵的工作点

泵的工作点即泵系统运行时泵性能曲线（扬程与流量之间的关系曲线）与泵系统性能曲线的交点。其物理意义在于泵系统输送流量所需的扬程与泵供给的扬程相等。工作点的流量为泵系统运行时实际的流量。工作点的流量应与设计中计划的流量相近，工作点对应的泵效率应接近于选用泵的额定效率。泵的性能曲线由泵的制造厂提供，因此同一套管路系统，选用不同型号或者不同制造厂的泵，工作点的流量可能不相同。同一泵不同管网系统或者不同工作状况（如扬程中不同输液提升高度不同的泵出口压力都会有不同的工作点）。

E.4 泵运行工况的调节

泵系统中改变管网性能曲线或者泵性能曲线，改变泵运行工作点，从而进行工况调节。

E.4.1 闸阀调节

闸阀调节事实上是改变泵系统中管网性能曲线从而改变泵的工作点。

改变阀门开度事实上是改变阀门的阻力系数，如图 E.5 中 S_A 是工作点 A 时管网（包括阀门阻力）的阻力系数， S_B 是工作点 B 时管网（包括阀门阻力）的阻力系数。

$$H = Z + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + SQ^2 \dots\dots\dots (E.10)$$

式中：

Z ——位置高度水泵管道进出的位置高差；

$\frac{P_1 - P_2}{\gamma}$ ——水泵管道进出的压力差；

SQ^2 ——水泵输水管道的损失。

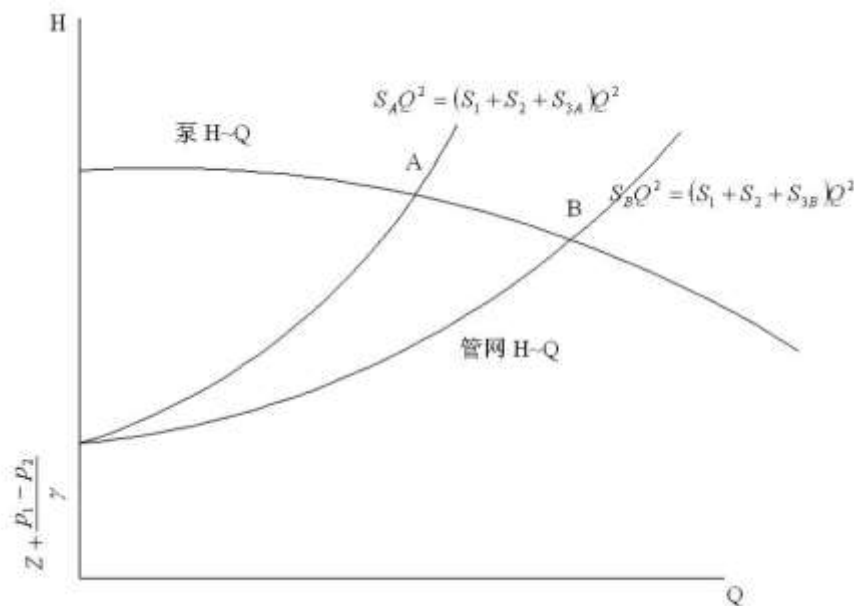


图 E.5 泵闸阀调节曲线图

图 E.5 中曲线 A、B 分别为泵在阀门开度 A 与 B 时的管道损失曲线。

E.4.2 泵的变速调节

根据泵性能的比例律

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \dots\dots\dots (E.11)$$

式中：

Q_1 ——为泵转速 n_1 时的流量，单位为 m^3/s ， l/s ；

- Q_2 ——为泵转速 n_2 时的流量，单位为 m^3/s ， l/s ；
- H_1 ——为泵转速 n_1 时的扬程，单位为米（m）；
- H_2 ——为泵转速 n_2 时的扬程，单位为米（m）；
- N_1 ——为泵转速 n_1 时的轴功率，单位为千瓦（kW）；
- N_2 ——为泵转速 n_2 时的轴功率，单位为千瓦（kW）；
- n_1 ——为泵转速，单位为转每分（r/min）；
- n_2 ——为泵转速，单位为转每分（r/min）。

如图：

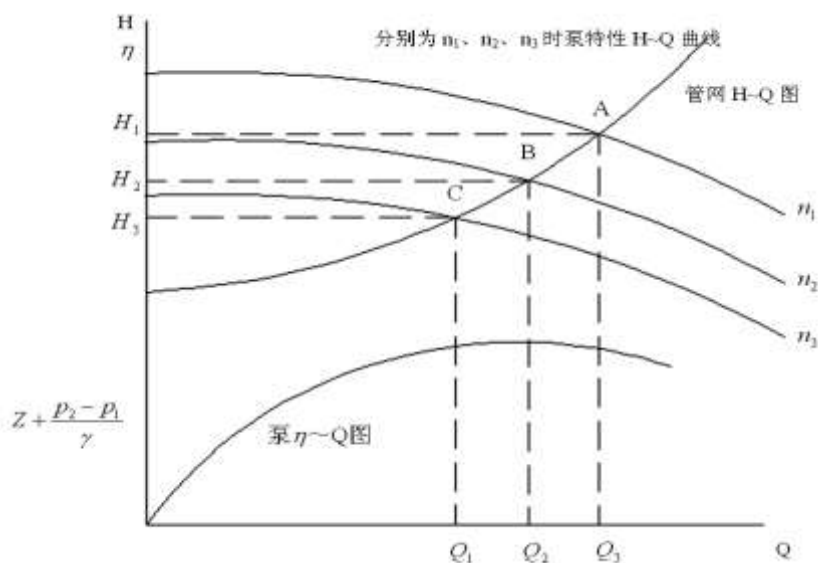


图 E.6 泵变速调节曲线图

图 E.6 中 A、B、C 三个工作点分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 三种转速的泵 $H \sim Q$ 性能曲线与管网 $H \sim Q$ 曲线的交点。

E.4.3 泵的并联调节

泵的并联调节一般采用同型号的泵并联。

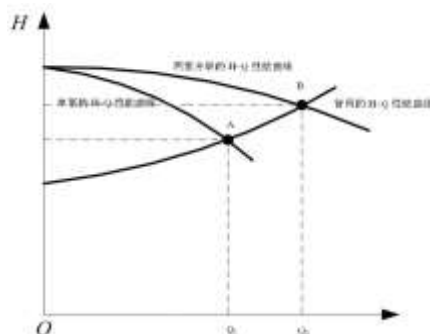


图 E.7 两台相同性能泵并联运行改变工况曲线

图 E.7 中 A 点为单泵性能曲线与管网 $H \sim Q$ 曲线的交点即单泵的工作点，B 点为两泵并联后性能曲线与与管网 $H \sim Q$ 曲线的交点即并联泵的工作点。

泵并联性能曲线绘制为等扬程两泵的流量叠加。

叠加后并联性能曲线与管网性能曲线的交点为新并联后的工作点。

E. 4. 4 泵的串联调节

泵串联的调节通常也采用同型号的泵串联。

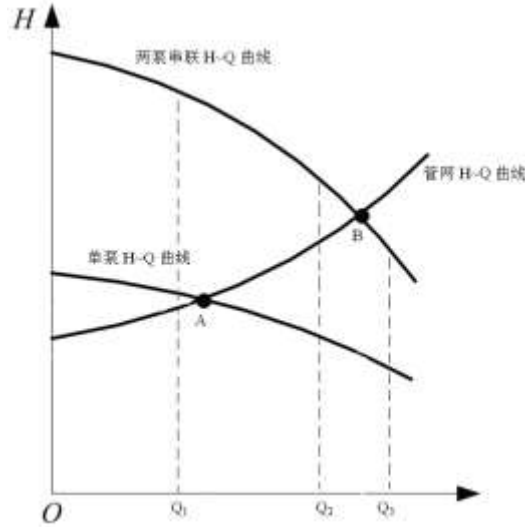


图 E. 8 两台相同性能泵串联运行改变工况曲线图

图 E. 8 中 A 点为单泵性能曲线与管网 H~Q 曲线的交点即单泵不串联的工作点；B 点为两泵串联后性能曲线与管网 H~Q 曲线的交点即两泵串联后的工作点。

串联后的性能曲线为同流量下两泵扬程叠加后绘出的性能曲线。

串联后 H~Q 性能曲线的交点为新的串联后的工作点。

E. 5 汽蚀余量 Δh 及汽蚀比转速 C

汽蚀余量 Δh 是泵为了防止产生汽蚀，在泵吸入口所需要的能量富裕 Δh_r ，在选择泵时应尽量选用 Δh_r 小的更安全、经济。但是水泵选出以后，在运行中，应保证泵吸入口应有高于 Δh_r 的能量富裕，保证泵的安全、经济运行，通常称为泵的有效汽蚀余量 Δh_a 。其计算式为

$$\Delta h_a = 10 - \frac{p_v}{\gamma} - h_{ls} - \frac{V_s^2}{2g} > \Delta h_r \dots\dots\dots (E. 12)$$

式中：

Δh_a ——泵的有效汽蚀余量，单位为米（m）；

Δh_r ——泵必须汽蚀余量（泵制造厂必须提供），单位为米（m）；

p_v ——当地汽化压力，单位为 kgf/m^2 ；

γ ——液体重率，单位为 kgf/m^3 ；

h_{ls} ——吸入管内的损失（包括沿程和局部损失），单位为米（m）；

V_s ——吸入口的速度，单位为米每秒（m/s）；

g ——重力加速度，单位为米每秒平方（ m/s^2 ）。

有时简单提出 $\Delta h_a = \Delta h_r + (0.5 \sim 1.5) \text{ m}$ 。

表示泵的汽蚀性能好坏的参数量也用汽蚀比转速 C ，其计算式为

$$C = \frac{5.62n\sqrt{Q}}{\Delta h_r^{3/4}} \dots\dots\dots (\text{E. 13})$$

式中：

C ——泵汽蚀比转速，单位为单位为转每分（ r/min ）；

n ——泵转速，单位为转每分（ r/min ）；

Q ——泵流量，单位为立方米每秒（ m^3/s ）；

Δh_r ——泵必须汽蚀余量，单位为米（ m ）。

从式中看出，若同规格的二台泵（即同流量同扬程，同转速）， C 值愈高， Δh_r 愈小，要求的有效汽蚀余量 Δh_a 愈小，对防止发生汽蚀愈有利，所以说汽蚀性能愈好。同样，若同规格的二台泵（同流量，同扬程）， C 值愈高，若 Δh_r 相同，允许泵的转速愈高，效率可能愈高，泵的体积愈小，愈节能。

附录 F

(资料性附录)

空气压缩机的特性及相关设备

F.1 空气压缩机的分类与特性

根据工作原理不同，空气压缩机可分为容积型和动力型两大类，如图 F.1 所示。容积型空气压缩机把一定容积的空气先吸入到气缸里，在气缸中强制缩小其容积，当达到一定压力时气体便被强制从气缸中排出。容积型空气压缩机可细分为许多种类，其中往复式及螺杆式空气压缩机应用最广。动力型空气压缩机，又称速度型空气压缩机，其工作原理是将气体的动能转化为压力能，主要有离心式和轴流式两种，其中离心式空气压缩机较常见。下面各节将对目前工业中应用比较广泛的空气压缩机进行简要介绍。

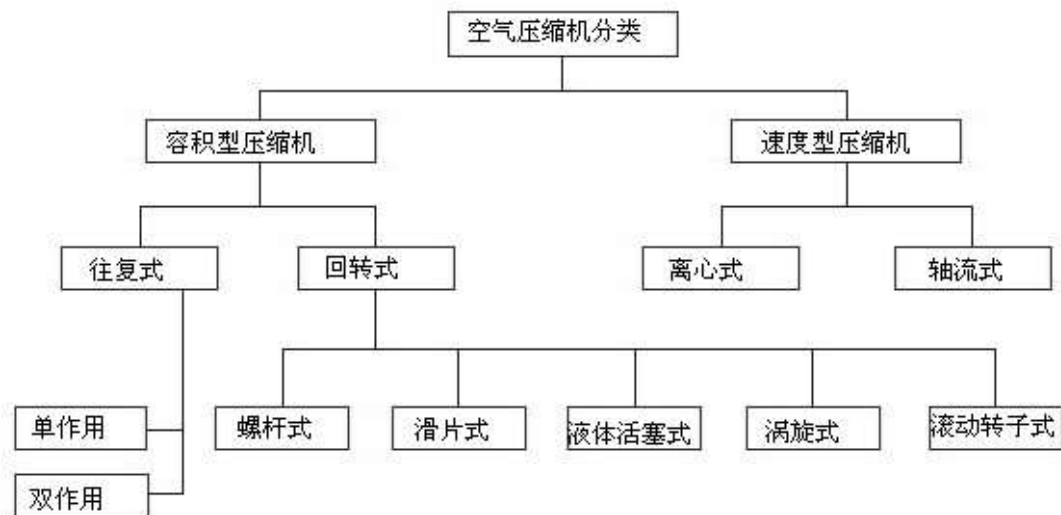


图 F.1 空气压缩机分类

F.1.1 往复式空气压缩机

往复式空气压缩机是以汽缸内的一个活塞作为压缩位移的原件，将封闭在一个密闭空间内的空气逐次压缩，缩小其体积并提高压力来完成压缩过程的。根据压缩机级数不同，往复式空气压缩机分为单级空气压缩机和多级空气压缩机，多级空气压缩机以两级为主。单级往复式空气压缩机吸入空气并直接将其压缩到最终用气压力，其压缩比是最终排气绝对压力与进气口绝对压力之比，0.75 MPa 表压（0.85 MPa 绝对压力）的空气压缩机的压缩比为 8.5。两级空气压缩机分两步将吸入的空气压缩到最终压力，每级压缩比是总压缩比的平方根，排气压力为 0.75 MPa（表压）时每级的压缩比为 2.92。三级压缩空气压缩机的每级压缩比是总压缩比的立方根。空气压缩机所消耗的功率与压缩空气质量和压缩比有关，具有 8.5 压缩比的单级空气压缩机比每级压缩比为 2.92（总压缩比 5.84）的两级压缩空气压缩机在压缩相同体积的空气时需消耗更多的能量。

往复式空气压缩机可进一步分为单作用和双作用往复式空气压缩机,当压缩过程仅靠活塞的一侧来完成时称为单作用往复式空气压缩机,靠活塞的两头来完成时称为双作用往复式空气压缩机。双作用往复式空气压缩机比单作用空气压缩机具有更高的运行效率,通常情况下,单作用空气压缩机的比功率范围为 $7.8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min}) \sim 8.5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$, 双作用空气压缩机为 $5.3 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min}) \sim 5.7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ 。

往复式空气压缩机设计特性限制了其总效率的发挥,这是因为在活塞表面和压缩腔顶部之间存在余隙,该空间使得被压缩的空气将会在吸入行程重新膨胀,会占据汽缸内本该通过进气阀进入的环境空气的体积。另外,这种已经被加热的压缩空气会对进气口的空气进行预热,降低了进入汽缸的气量。阀门和活塞密封环是易损件,当阀门和密封环经过磨合密封良好时,往复式压缩机的使用效率是最高的。如果阀门和密封环发生磨损并丧失密封能力,空气或气体会泄漏而降低空气压缩机的效率。

F. 1.2 螺杆式压缩机

螺杆式压缩机是一种转子做高速旋转运动的容积型压缩机,目前在工业领域中应用非常广泛。螺杆式压缩机的机体内部空腔是两个轴线相互平行的圆柱形孔连成的空间。两个转子分别安装在机体内两圆柱形孔中,节圆外具有凸齿的转子称为阳转子,节圆内具有凹齿的转子称为阴转子。阴、阳转子上的螺旋体分别称为阴螺杆和阳螺杆。在压缩过程中,阴螺杆在经过空气入口时将外界空气吸入压缩机,然后转过空气入口与阳螺杆一起完成空气压缩,再继续转动阴螺杆与空气出口接通,压缩空气从空气出口排出,其工作原理如图 F.2 所示。

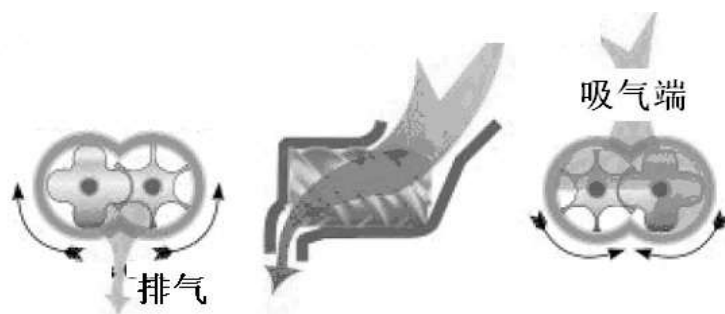


图 F.2 螺杆式空气压缩机工作原理图

螺杆式空气压缩机可分为单级和两级螺杆式空气压缩机。两级螺杆式空气压缩机的空气压缩过程分两级完成,在吸气和排气压力相同的情况下,总压缩比低于单级压缩空气压缩机,由于压缩气体所消耗的功率是总压缩比和质量流量的函数,因此在压缩相同质量流量的压缩空气时,两级压缩空气压缩机的效率高于单级压缩空气压缩机。

螺杆式空气压缩机又可分为喷油型和无油型两种。喷油螺杆式空气压缩机主要用于普通工业供气场合,无油型螺杆空气压缩机通常用于食品、制药以及电子等行业。喷油型和无油型螺杆空气压缩机的压缩原理基本一致,不同之处在于无油螺杆式空气压缩机没有润滑剂进入压缩腔。

无油螺杆式空气压缩机有干式和水润滑两种类型:

a) 干式无油螺杆式空气压缩机

由于没有液体带走压缩产生的热量，所以多采用两级压缩，两级之间有冷却器，第二级后有后冷器。由于缺乏液体密封，其转速比喷油螺杆式空气压缩机要高。单级压缩干式无油螺杆空气压缩机的排气压力可达到 0.35 MPa，两级压缩可达到 1 MPa。

b) 水润滑无油螺杆式空气压缩机

由于有水进入压缩腔，在起到密封作用的同时可带走空气压缩过程中产生的热量，只要单级压缩排气压力就可达到 0.69 MPa~1 MPa。

一般而言，喷油螺杆式空气压缩机的比功率范围为 $5.7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min}) \sim 6.7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ ，无油螺杆式空气压缩机的比功率范围为 $6.4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min}) \sim 7.8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ 。

螺杆式空气压缩机的控制方法主要有如下几种。

a) 加载/卸载

加载/卸载控制是螺杆式空气压缩机最早使用的控制方法之一，压力控制范围约为 0.07 MPa~0.1 MPa。空气压缩机将运行在全容量下，直到检测到系统压力达到压力开关的最高压力设定点。当该设定点达到时，发出一个信号关闭进气阀，同时释放一些或全部润滑油分离器的压力。通过关闭进气阀，压缩机就可空载运行。当系统压力降低到更低的压力设定点时，发出信号重新打开进气阀，同时压缩机再次在满载条件下运行。如果压缩空气系统具有足够的压缩空气存储容量，这种控制可充分满足系统要求；系统中没有足够的储气容量，加载/卸载控制会导致比预计值更高的能耗，系统压力波动比较频繁，从而降低了设备的使用寿命。

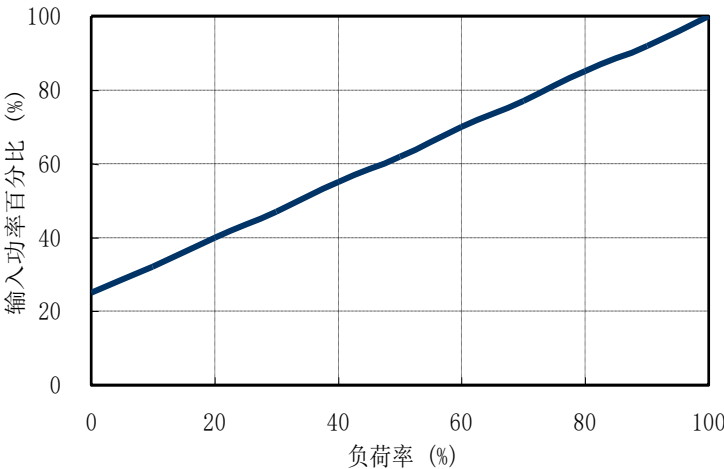


图 F.3 加载/卸载控制空气压缩机负荷功率对比曲线

在多台空气压缩机并联运行时，空气压缩机的数目会受到最大允许的系统压力波动范围限制。由于每个加载/空载机械在最大和最小压力点设定点与最近的压缩机至少具有 0.014 MPa 的差压，按这种方式进行分级，原来设计的在 0.69 MPa 和 0.75 MPa 间运行的系统，在增加压缩机之后系统压力波动范围将进一步增加而导致系统平均供气压力上升，空气压缩机的运行功率也会随之增加。

b) 恒压（调节）控制方式

加载/卸载控制的系统压力波动范围约为 0.07 MPa，这种压力波动在大多数场合对于设备运行是不利的，因为空气设备的效率对于每个 0.07 MPa 的供气压力都会发生 1%和 1.4%的

变化。在系统存储容量较小的情况下，加载/卸载控制会产生频繁的压力波动和进气阀磨损。恒压（调节）控制的空气压缩机通过最低限度的阀门动作保证系统供气压力的稳定，从而解决了这两个问题。但对于恒压控制的空气压缩机，增加储气罐的容量不会产生与加载/卸载空气压缩机相同的节能效果。

压缩气体所要求的功率与气体质量流量和压缩比有关。系统压力上升时空气压缩机进气阀关小，空气压缩机流量降低，压缩比增加。调节空气压缩机部分载荷操作运行需要的功率较大，效率明显降低。在多台空气压缩机应用场合，调节压缩机运行受到作为加载/空载压缩机机器数目的相同限制。多台空气压缩机在相同时间低于满载运行使系统压力非常稳定，但使用效率非常低。

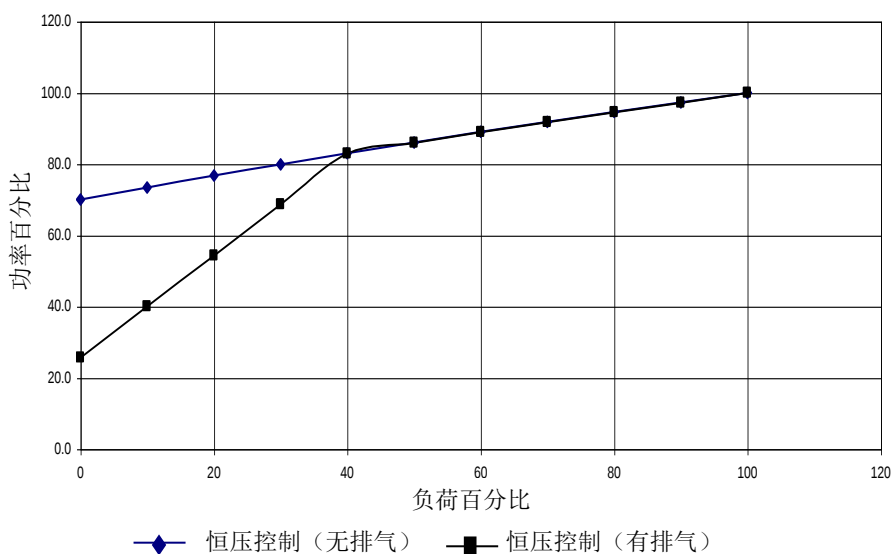


图 F.4 恒压控制空气压缩机负荷功率对比曲线

c) 转子长度控制装置

转子长度控制可使空气压缩机在压缩比不增加的情况下实现空气压缩机输出与系统要求相匹配。通过有效控制转子压缩区域的长度，空气压缩机可在 50%~100%容量的范围内保持进气压力和压缩比非常稳定。该种控制方法由于在降低空气质量流量时压缩比不增加，所以在部分负荷运行时，比调节控制和加载/卸载控制空气压缩机在效率上具有一定的优势。当空气压缩机负荷低于 50%时，空气压缩机首先进行入口阀恒压控制，控制范围一直到入口阀完全关闭，或者当负荷低于 40%时空气压缩机进行下载。

目前，转子长度控制主要有回转阀、螺旋阀、步进控制阀、提升阀等方法，所有控制类型在部分负载运行范围的一些点都能比调节控制装置或者加载/卸载控制装置提供更高的效率，但各种类型转子长度控制的设计和制造在运行和效率上不尽相同。其中，回转阀和螺旋阀在设计本质上基本完全一致，步进控制阀和提升阀控制原理与回转阀和螺旋阀相似，但控制精度更高。

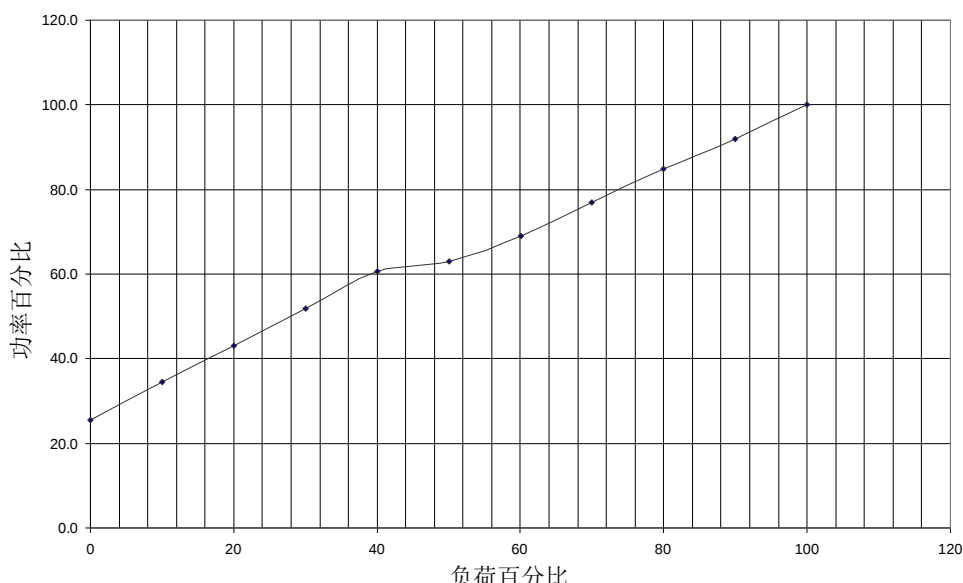


图 F.5 转子长度控制空气压缩机负荷功率对比曲线

d) 变速控制

变速控制是通过改变压缩机主机的速度来使压缩空气的供气与用气相匹配的,变速驱动通常采用变频驱动或者开关磁阻驱动实现。由于采用变速驱动后,空气压缩机排气压力变化很小并且进气口压力非常恒定,在设计和匹配合理时这种控制类型非常有效。一些变速驱动空气压缩机在电机转速降低到20%左右时空气压缩机会停机,或在负荷降低到40%~50%时空气压缩机会下载,其下载功率为加载功率的10%~15%。变速驱动空气压缩机也需配备适当容量的储气罐。

由于变速驱动过程存在一些内在损耗,因此在选用变速驱动压缩机时需特别注意。变速驱动控制模式在负荷变化比较大且很少处于满载状态的单个压缩机应用场合工作效果最佳,在多台空气压缩机应用场合,变速控制压缩机应只作为调节压缩机使用。这种控制类型在部分负载时效率最高,但当空气压缩机处于连续满负荷运行时,驱动装置的内部损耗使该控制模式的能效反而降低。

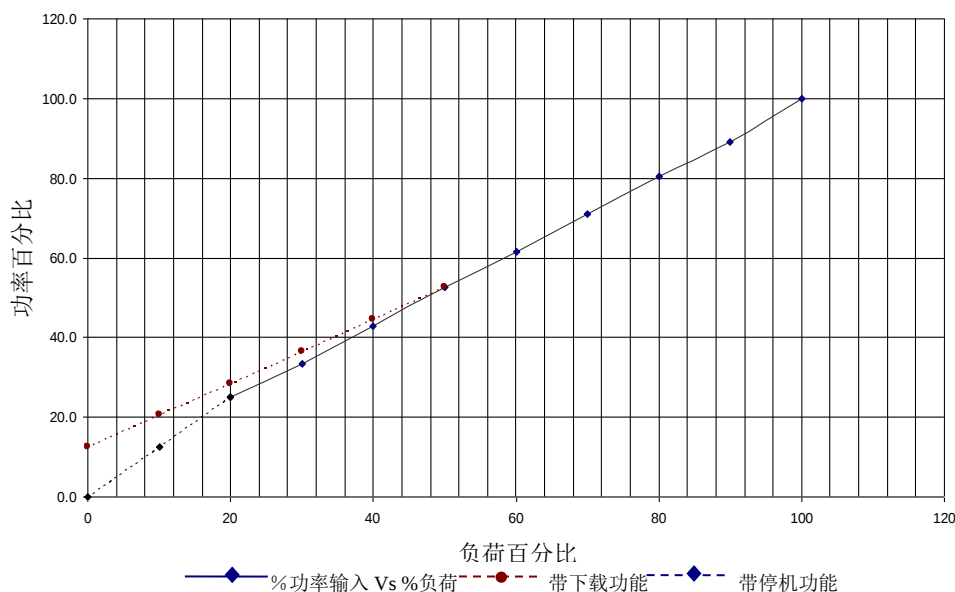


图 F.6 变频控制空气压缩机负荷功率对比曲线

F. 1. 3 离心式空气压缩机

离心式空气压缩机是工业中最常见的动力型空气压缩机，它通过增加进口气流速度将动能转化成压力来产生压缩空气。离心式空气压缩机一般带有一组或者多组叶轮用来加快进口气流，叶片可产生大约 50% 的压力，其余的压力是压缩空气在扩散体和涡壳内流速降低时产生的。离心式空气压缩机的叶轮旋转速度非常高，有时会超过 50000 r/min。通过流速产生压力需经过多级压缩才能达到工厂所需要的压力等级，目前两级和三级离心式空气压缩机较常见。

离心式空气压缩机的性能曲线如图 F. 7 所示，排气压力随着流量的增加而降低。叶片数量越多，曲线越平坦；叶片越向后倾斜，曲线越陡。当空气压缩机入口温度降低时空气密度增加，空气压缩机质量流量和压力能力也随之增加。当离心式空气压缩机负荷降低到一定程度时扩散器中可能会产生回流现象，称为喘振，这对离心式空气压缩机的运行非常不利，目前大多数离心式空气压缩机负荷控制系统具有控制喘振的设定。

当系统流量需求比较大时通常会采用离心式空气压缩机，其流量可达 3000 m³/min，甚至更大，其比功率范围约 5.7 kW/ (m³/min) ~ 7.1 kW/ (m³/min)。当离心式空气压缩机容量超过 45 m³/min 时，且作为基本负载运行时，离心式空气压缩机在效率和运行成本方面比大型的螺杆式空气压缩机才具备一些优势。另外，离心式空气压缩机流量必须在设计点附近才能保持良好的功能，不应当在用气量波动的场合使用。

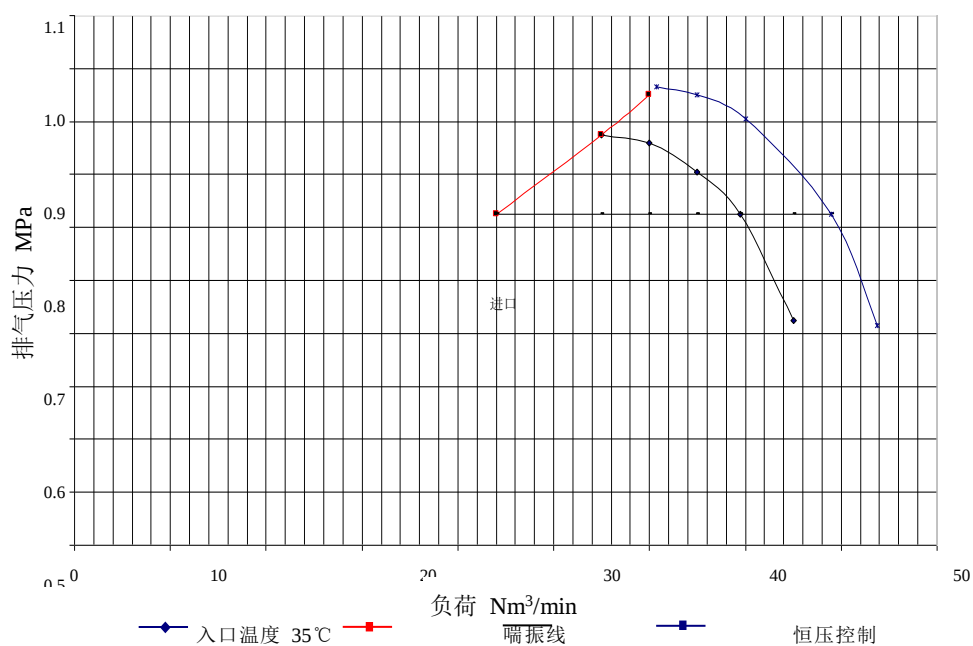


图 F. 7 离心式空气压缩机性能曲线

F. 2 空气后处理设备

F. 2. 1 干燥机

压缩空气的许多应用场合对含水量都有明确要求，空气处理的首要任务是除去压缩空气中的水，达到干燥程度的要求。一台额定产气量为 $5\text{ m}^3/\text{min}$ 的空气压缩机在入口温度为 20°C ，70%相对湿度和 1 个大气压时，一天会压缩水蒸汽产生 30L 的水，其中约 20L 的水会在空气压缩机内部的后冷器中冷凝（假设排气压力为 0.7 MPa ，空气压缩机出口温度为 30°C ），干燥机的作用就是将剩余 10 L 水的大部分除去，以满足工艺对压缩空气的需求。干燥机类型很多，分别采用不同的干燥方法对压缩空气进行干燥，如图 F. 8 所示。下面介绍几种较常用的干燥机。

F. 2. 1. 1 冷冻式干燥机

冷冻式干燥机采用降温结露的工作原理，主要由热交换系统、制冷系统和电气控制系统三部分组成。压缩空气首先进入冷热空气交换器，和已经被蒸发器冷却到压力露点的冷空气进行热交换，之后压缩空气进入蒸发器，与制冷剂进行热交换，压缩空气的温度降至 $3^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ ，空气中的水分析出，通过气水分离器后经过自动排水器排出，而干燥的低温空气进入冷热空气交换器进行热交换，温度升高后输出，原理如图 F. 9 所示。

虽然经过冷冻式干燥机处理后的压缩空气压力露点一般仅为 $3^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ ，没有其他类型的干燥机低，但这个露点已经能满足一般的工厂要求。由于具有投资少和运行费用低等优点，冷冻式干燥机目前在工业中应用非常广泛。

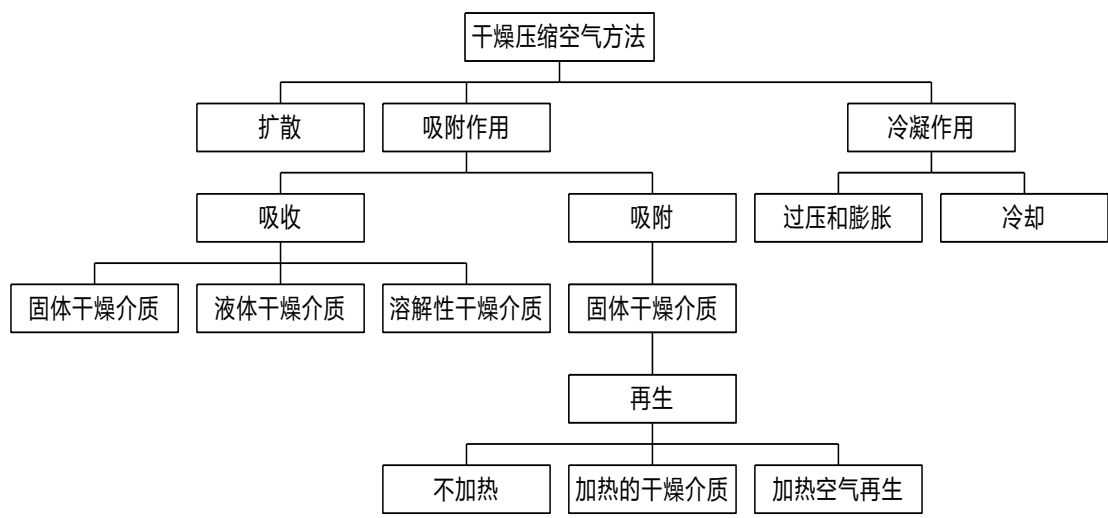


图 F.8 干燥压缩空气的方法

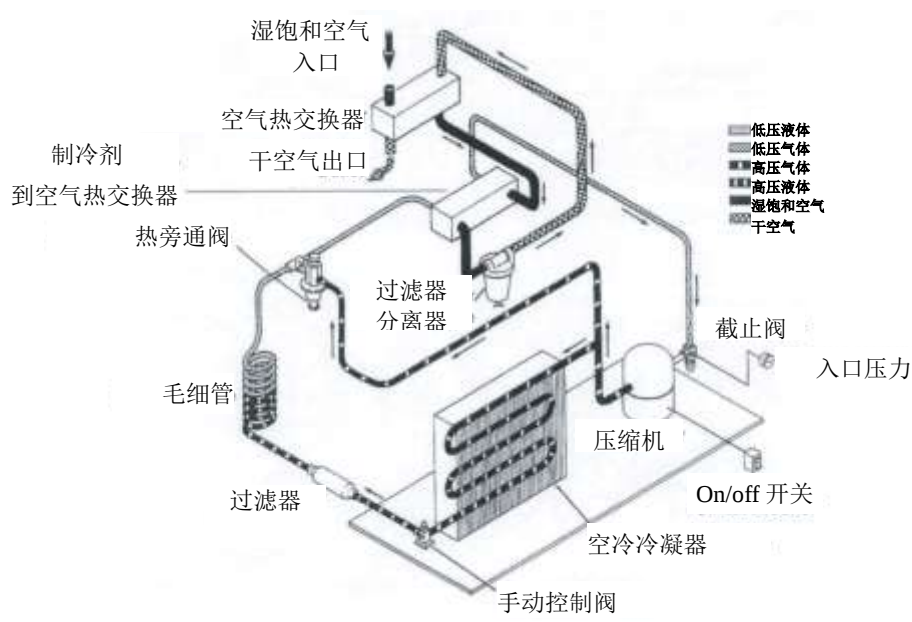


图 F.9 冷冻式干燥机流程图

F.2.1.2 吸附式干燥机

吸附式干燥机利用物理方法对压缩空气进行干燥，原理为：当未经干燥的压缩空气与吸附剂充分接触时，空气中的水分子扩散到吸附剂上并因范德华引力而被吸附。与此同时，被吸附的水分子因本身的热运动及外界气态分子碰撞，有一部分离开吸附剂表面返回气相，即发生脱附。当同一时间内水分子的吸附量与脱附量相等时，就达到一个动态吸附平衡，此时吸附与脱附过程均在进行，但速度相等，这种动态吸附平衡是在一定温度与压力条件下建立的。吸附式干燥机一般采用双塔式，一塔进行吸附，另一塔进行再生。再生周期的控制方法主要有三种：根据预设的周期进行循环；根据干燥塔内空气的温度和湿度进行循环；根据离开干燥塔的空气的露点进行循环。根据再生方式的不同吸附式干燥机可分为无热再生式干燥机、内部加热再生式干燥机和外部加热再生式干燥器。

无热再生式干燥机没有内置或外置加热器，其再生气量为干燥机额定处理气量的 10%~18%。如果增加露点控制器，在一定时期内可显著节省再生气量消耗。一般而言，这种干燥机在入口压力为 0.7 MPa 时，压力露点可达-40℃，甚至可达-70℃。典型的无热再生式干燥机流程如图 F.10 所示。

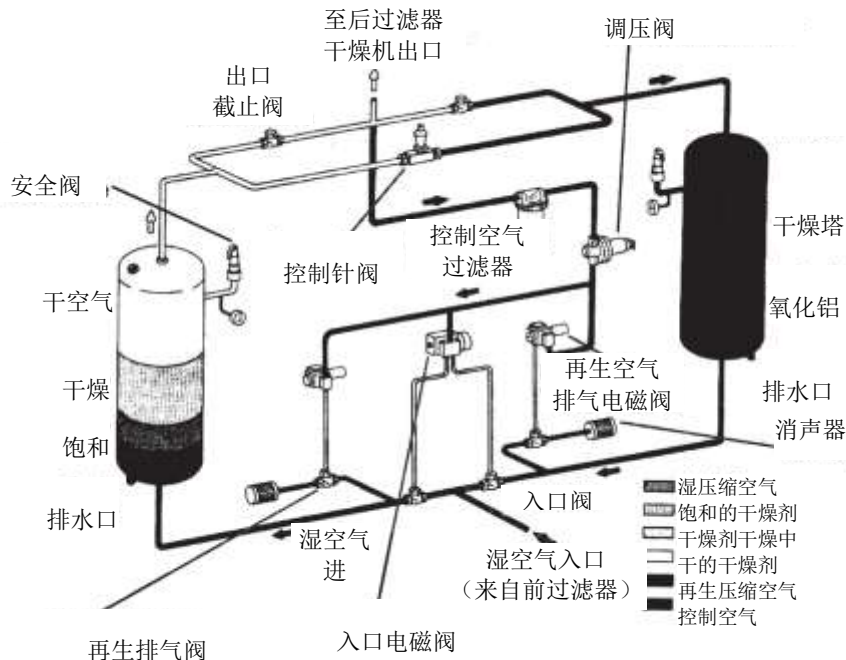


图 F.10 无热再生吸附式干燥机流程图

内部加热再生式干燥机用蒸汽或电加热器加热干燥剂床，减少用于再生空气的消耗约 5%。

在外部加热的再生式干燥机中，再生空气被加热到合适的温度，然后通过干燥剂床，再生气量大约为流过干燥机气量的 5%~8%。

为保证干燥剂免受压缩空气从空气压缩机中带出的润滑油污染而影响干燥效果，在干燥机上游通常安装过滤器。为保护干燥机下游过滤器免受干燥剂粉末的影响，在干燥机下游建议安装颗粒过滤器。

F.2.1.3 压缩热式干燥机

压缩热式干燥机是利用空气在压缩过程中产生热量使干燥剂再生。在离心式空气压缩机或无油螺杆式空气压缩机中应用可达到很好的节能效果。热压缩式干燥机分为转桶式和双塔式两种类型，其中转桶式干燥机露点会受到冷却水温度的影响，可达-15℃~-40℃，双塔式干燥机可达-40℃。

转桶式压缩热式干燥机可对压缩空气进行连续干燥，没有中间的切换过程。干燥是在一个压力容器进行的，干燥鼓在压力容器内旋转把压缩空气气流分成两部分，一股气流直接来自于压缩机出口后冷器之前，用于再生。另一股气流是压缩机排出压缩空气的剩余部分，经后冷器到达这里，经干燥床后被干燥，之后两部分气流会合。转桶式压缩热式干燥机的原理如图 F.11 所示。

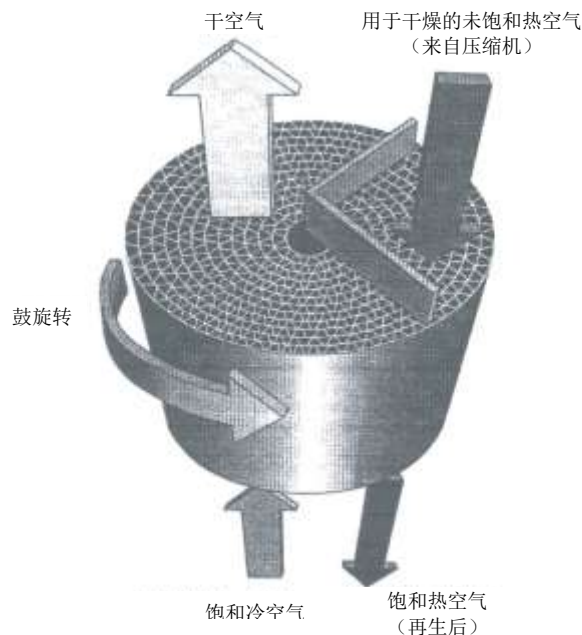


图 F. 11 热压缩式干燥机原理图

双塔式干燥机与其它双塔式再生干燥机原理相似，区别在于双塔式压缩热干燥机的再生热空气来自空气压缩机出口，其循环方式与其它的双塔式再生干燥机相同。

F. 2. 1. 4 吸收式干燥机

吸收式干燥机采用化学方法对压缩空气进行干燥，化学原理是干燥剂与压缩空气中水蒸汽发生化学反应。工业中多采用固体干燥剂，当压缩空气从底部向上通过干燥剂床时水蒸汽被干燥剂部分吸收。干燥剂被逐渐消耗，需要定期添加。这种类型干燥机的压力露点约可达 15°C ，只有当压缩空气在管道中不会进一步被冷却时才考虑使用。另外，如果进气温度低于 30°C ，干燥介质会变潮，会导致压力过大下降。

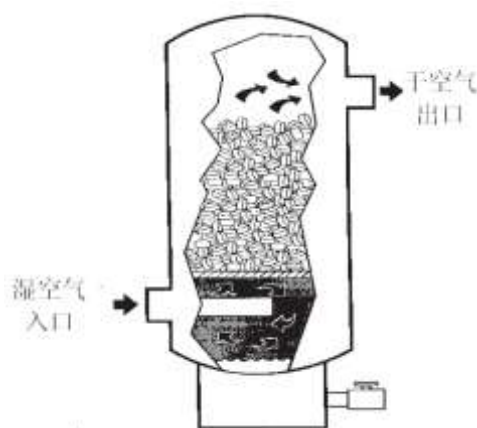


图 F. 12 吸收式干燥机原理流程图

F. 2. 2 过滤器

过滤器在压缩空气干燥净化系统中作用关键。采用不同的过滤器可去除压缩空气中的油、固体杂质、微生物、有害气体等污染物。按用途分为：除油过滤器、除尘过滤器、除菌过滤器及专用过滤器等。除油过滤器也称凝聚式过滤器应用最广，主要作用是去除压缩空

气中的油雾（胶体）。严格的说，除尘过滤器与除油过滤器是同一类型，其区别在于除尘过滤器常用在吸附干燥器的出口处。除菌过滤器，是一种卫生级过滤器，主要去除压缩空气中的微生物，除菌过滤器前必须先经过除油过滤器处理。最典型的专用过滤器是活性炭过滤器，可过滤压缩空气中的某些有害气体和异味，属于化学过滤器。

凝聚式过滤器建议安装在吸附式干燥器前，防止吸附剂床失效。压缩机下游的压缩空气过滤器常用于去除污染物，如小颗粒、冷凝物和润滑油。按工艺需要将压缩空气过滤到需要的程度将使系统的压降最小化，使能耗降到最低。根据压降来更换过滤装置，使压降和耗能最小化，至少一年检查一次。

F.2.3 排水器

排水器的作用主要是将压缩空气系统中产生的冷凝水排出，主要有四种类型。

F.2.3.1 手动式排水器

操作人员手动开启阀门排出冷凝水。由于需要开关阀门太频繁，手动阀往往一直被打开来排出中间冷却器、冷冻干燥器和过滤器等中产生的凝结水，会使压缩空气连续溢向大气。

F.2.3.2 机械式液位控制排水器

机械式液位控制排水器通常采用液位驱动排水开关，较常见的是浮子式排水器。浮子式排水器在正确的维护下不会浪费压缩空气，但需大量的维护工作容易被冷凝水中的沉淀物堵塞。

F.2.3.3 时间控制排水器

时间控制排水器具有一个计时器，根据时间设定来驱动电磁阀打开和关闭。这种类型的排水器有存在两个问题：一是阀门开启时间或许不足以排出所有的水和污染物；二是在阀门打开的时间内可能需要排的水或污染物很少，压缩空气被排到大气中。

F.2.3.4 零压缩空气损失排水器

常见的零空气损失排水器有两种类型。

a) 浮子或者液位传感器控制一个电磁阀或者球阀使凝结水的液位低于排水器腔的高位点。

b) 浮子激发一个气动信号到一个气缸来驱动球阀，通过一个连接口将凝结水排至容器的低点水位。

F.3 储气罐

作为压缩空气系统供气侧的主要设备之一，储气罐的作用是存储一定量的压缩空气以备系统需要，同时可稳定系统压力波动。压缩空气用气侧的储气罐通常被称为一次储气罐，根据储气罐的位置不同分别被称为湿储气罐和干储气罐，目前大多数企业一般只配置一种类型。

湿储气罐通常位于干燥机前的空气压缩机出口，可稳定空气压缩机出口压力，防止空气压缩机的频繁加载。另外，通过辐射传热，湿储气罐可对压缩空气预冷，减少干燥机的负荷。如果系统负荷突然超过空气压缩机容量和干燥机的处理能力，会使得干燥机在短时间内超负

荷工作，空气质量下降，干燥机压降增加。所以，当系统负荷比较平稳时，只配备湿储气罐较合适。

干储气罐位于干燥机下游，当系统负荷突然增加时，空气可由它提供，通过干燥机的流量仍是空气压缩机的产气量，因此干燥机过载的可能性很小，压缩空气的露点不受影响。当对空气压缩机的出口压力进行设定以保证干储气罐达到目标压力时，必须要考虑干燥机和过滤器的压力损失。

为使系统更高效的运行，建议系统在干燥机前安装湿储气罐及在干燥机和过滤器后安装干储气罐。储气罐的大小，可根据系统负荷的变化按下式进行计算：

$$V = (T \times C \times P_a) / (P_1 - P_2) \dots\dots\dots (F.1)$$

式中：

- V ——储气罐体积，单位为立方米（ m^3 ）；
- T ——允许压力下降的时间，单位为分（min）；
- C ——压缩空气流量负荷，单位为立方米每分（ m^3/min ）；
- P_a ——大气压力，单位为兆帕（MPa）；
- P_1 ——储气罐初始压力，单位为兆帕（MPa）；
- P_2 ——储气罐终止压力，单位为兆帕（MPa）。

另外，随着对压缩空气系统研究的深入，开始将压力流量控制系统安装于干储气罐之后，对压缩空气系统储气量进行控制，控制装置前后具有一定的压力差，这样在干储气罐中保持一定储量的压缩空气，而控制系统后的压力保持在系统可接受的尽可能低且比较稳定的压力水平，最大限度地减少人为假设用气量。