

变频调速

应用实践

张燕宾 主编



机械工业出版社
China Machine Press

变频调速应用实践

张燕宾 主编
陶绪楠 校



机械工业出版社

本书不是一本简单地将应用实例汇编在一起的书，它有自己的特色。

力求系统地讲解如何根据各种机械的特点来设计和配置变频调速系统。为此，对于每个实例，都要分析有关机械拖动系统的特点和要求，以及在采用变频调速时的基本想法和具体措施。

为了便于一些对变频器还不很熟悉的同志也能读懂，本书在第1、2章中，对中小容量通用变频器和中高压变频器概括地作了介绍。

本书希望能对辛勤地劳动在第一线的各行业电气技术工作者有所启发和帮助。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频调速应用实践/张燕宾主编. —北京: 机械工业出版社, 2000.12

ISBN 7-111-08569-8

I. 变… II. 张… III. 变频调速 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 76901 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李振标 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张佳

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·11.5 印张·307 千字

0 001—4 000 册

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书的酝酿，是在第五届《中国交流电机调速传动学术会议》（1997年11月于海南举行）的会议期间。当时，同行们普遍认为：在我国，变频调速技术在工矿企业中的应用尚处于初期阶段，其普及的程度与我国四化事业的蓬勃发展很不相称。机械工业出版社的李振标同志在广泛听取了与会代表的看法以后，提出了编写一本深入浅出地介绍变频调速技术在各行各业应用实践的读物的创议，得到了许多与会者的附议。当时，我刚退休，在时间支配上处于自由状态。又刚出版了一本题为《SPWM变频调速应用技术》的小册子，算是有了一点出书的经验吧，于是被荣幸地推举为主编。

迄今为止，各种各样的变频调速应用汇编，已并不罕见。但大致说来，不外是两大类：一类是论文集，其特点是理论性较强，在论述上常偏重于作者有创造性的部分，而不求全面。这一类书，往往曲高而和寡，没有相当基础的技术工作者是难于看懂的。另一类则常常以“应用汇编”为名，然而内容上往往着重于说明应用后的效果，而对具体方法和技术处理涉及较少，有人戏称之为“给决策者看的”，对于在第一线具体实践者的启发和帮助明显地不足。本书则旨在独辟蹊径，希望能够真正地成为一本对各个行业的电气技术工作者有所帮助的深入浅出的读物。

在着手编辑此书时，我的潜在意识里，想到的是在学生时代学习过的一本叫作《生产机械电力装备》的书，它系统地讲解了如何根据各种机械的特点来设计和配置电气设备。我想，本书要是大体上也能体现出类似的特点，将是很有意义的。我以此作为努力的方向！这个想法弄得我作茧自缚，使我的工作量增加了许多倍。每篇文章，我都要和作者往返多次，请他们一遍又一遍地

“削足适履”，使之符合我所规定的框框。我感到十分荣幸的是，得到了所有作者的真诚合作。

无疑，本书是一种尝试，它不可避免地会有许多不尽人意之处。例如，一个明显的事实是，由于各位作者的学识、经历以及写作风格的不同，要想使本书完全地做到浑然一体，是不可能的；再者，受本人才学浅薄的限制，编辑的不当之处，也在所难免；此外，本书涉及的面还很不全面，也不能不说是一件憾事，等等。

借此机会，我谨代表本书的所有作者表达一点心意：如果本书能够得到广大读者认可的话，那么，我们希望，这本书的出版，不是这一工作的终结，而是一个开端。从这个意义上说，我们所做的工作是一次初探，或者说，是抛出一块问路的小砖头。希望因此而引出更多的同行们献出自己的“玉”来，使《变频调速应用实践》不断地扩充和完善，能不断地有续篇和再续篇问世。目的只有一个：为变频调速技术在我国普及和推广添砖加瓦，为祖国的四化建设贡献力量！

最后，衷心地感谢机械工业出版社和所有作者给予我的大力帮助和支持！

张燕宾

1999年于宜昌

目 录

前言

绪论 (张燕宾)	1
1 推广变频调速技术的现实意义	1
2 实现变频调速必须解决的问题	2
3 变频器的额定数据和分类	7
第 1 章 中小容量通用型变频器 (张燕宾等)	10
1 交-直-交电压型变频器的主电路	10
2 变频器的控制电路	16
3 变频调速拖动系统综述	22
4 变频器的功能综述	32
5 变频调速系统的节能问题综述 (张燕宾、张选正)	43
6 变频调速系统的抗干扰问题 (张选正、张燕宾)	51
第 2 章 高 (中) 压变频器 (胡纲衡)	56
1 概述	56
2 典型高压变频器线路介绍	67
3 高压变频器调速系统的设计	76
第 3 章 风机、水泵和空气压缩机的变频调速	91
1 风机的变频调速 (张永惠、陈祖安)	91
2 无塔上水的变频调速 (郝晓弘)	109
3 恒压供水变频调速系统 (张翰、孙春雷)	128
4 农村恒压供水的变频调速 (曲国强)	139
5 中央空调的变频调速 (张志奇、黄志辉)	142

6 压缩机的变频调速 (张选正)	149
第4章 机床、起重机械的变频调速	153
1 普通车床主轴的变频调速 (张燕宾)	153
2 高速磨床的变频调速 (刘文胜)	164
3 大型龙门刨床的变频调速 (刘文胜)	171
4 桥式起重机的变频调速 (胡纲衡、张燕宾)	185
第5章 纺织、塑料等机械的变频调速	195
1 并纱机的变频调速 (曲国强)	195
2 印染机械的变频调速 (张燕宾)	197
3 塑料机械的变频调速 (陈林康)	204
4 矫平定尺送料装置的变频调速 (陈兴国)	211
5 单面瓦楞纸板机的变频调速 (陈兴国)	216
第6章 冶金机械的变频调速	224
1 高炉卷扬机的变频调速 (陈乐柱、汪光阳)	224
2 炼钢转炉倾动机构的变频调速 (陈乐柱、汪光阳)	235
3 轧钢厂输送辊道的变频调速 (汪光阳、陈乐柱)	263
4 轧机主拖动交-交变频调速 (汪光阳、陈乐柱)	289
5 线材卷绕机的变频调速 (许向阳、冀秀玲)	323
6 初轧开坯机的变频调速 (吴志毅、冀秀玲)	327
7 可逆热轧机主拖动的同步变频调速 (韩发智)	335
附录 变频器的应用效果汇总 (杨贵庭、汪华胜、	
张建荣、杨飞)	357

绪 论

(张燕宾)

1 推广变频调速技术的现实意义

在电力拖动领域，解决好电动机的无级调速问题具有十分重要的意义。例如：

1) 可以大大提高工农业生产设备的加工精度、工艺水平以及工作效率等，从而提高产品的质量和数量；

2) 可以大大减小生产机械的体积和重量，从而减少金属的耗用量；

3) 对于风机和泵类负载，如采用调速的方法改变其流量，节电率可达(20~60)%；等等。

自从19世纪80年代发明了三相交流异步电动机以来，由于其转子回路内的电流不必从外部通入，转子的结构极为简单坚固、易于维护。因而长期以来，在工农业生产设备中的占有率始终处于绝对领先的地位。

然而，在调速方面，三相交流异步电动机竟长期处于“低能儿”的状态，一直使广大的电工业界引以为憾。实现三相交流异步电动机的无级调速，成为了人们翘首以待的“世纪之梦”。

所以，一旦变频调速技术取得突破、进入实用阶段以后，其发展便极其迅猛。在不到20年的时间里，已被国内外公认为是最理想、最有发展前途的一种调速方式了。

变频调速技术在我国推广应用已有10多年。总的说来，普及的面还很小，仍处于起步阶段。究其原因，主要是两个方面：

1) 价格高昂，一直是阻碍变频调速技术推广应用的一个主要原因；

2) 变频调速具有一定的技术难度, 人们需要有一个了解和熟悉的过程。

但是, 随着电力电子技术的不断进步, 变频器的价格已经有所下降; 同时, 介绍变频调速应用技术的书籍正在陆续出版 (本书便是这方面的努力之一); 加以, 党中央、国务院正在大力提倡技术创新, 在《中华人民共和国节约能源法》第 39 条中, 并将变频调速列入通用节能技术加以推广, 许多设备的技术改造势在必行。所以, 推广普及变频调速技术有着十分重要的现实意义。

2 实现变频调速必须解决的问题

三相交流异步电动机发明于 19 世纪 80 年代, 由于其转速

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (0-1)$$

式中, n 为每分钟转速; f 为交流电的频率; p 为磁极对数; s 为转差率。

所以, 从发明异步电动机的那一天起, 就已经知道了改变频率可以调速的原理。然而, 变频调速技术进入实用阶段却是在 20 世纪 80 年代, 中间竟相隔了将近 100 年!

那么, 实现变频调速究竟需要解决哪些关键问题呢?

2.1 大功率开关器件是实现变频调速的必要条件

今以目前应用得最为普遍的“交-直-交”变频器为例, 简要说明如下。

2.1.1 “交-直-交”变频器的构成

如图 0-1 所示, “交-直-交”变频器的基本电路: 先将电源的三相 (或单相) 交流电经整流桥整流成直流电, 又经逆变桥把直流电“逆变”成频率任意可调的三相交流电。

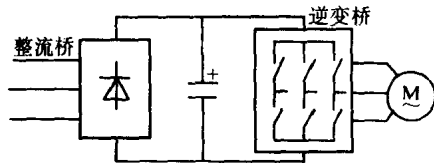


图 0-1 “交-直-交”变频器的构成

在这里, 逆变桥是变频

的关键部分，它由六个开关器件构成。逆变过程是这六个开关器件按一定规律不停地导通和截止（关断）的过程。这六个开关器件必须满足以下要求：

- (1) 能承受足够大的电压和电流；
- (2) 允许长时间频繁地接通和关断；
- (3) 接通和关断的控制必须十分方便。

因此，能否生产出满足上述要求的大功率开关器件便是实现变频调速的关键。

2.1.2 变频器的产生与发展

直至 20 世纪 60 年代，随着晶闸管（SCR）功率的不断增大，才使变频调速具有了现实可能性。而使变频调速器达到普及应用的阶段，则是在 20 世纪 70 年代，大功率晶体管（GTR）问世之后。到 20 世纪 90 年代，场效应晶体的出现和不断提高，又使变频调速器在各个方面都前进了一步。

可见，变频器的产生、成长和发展，是和最大功率开关器件的进步密不可分的。

2.2 必须解决好变频又变压

2.2.1 电动机要求主磁通不变

1. 电动机要求主磁通 Φ_m 保持不变的原因

(1) 主磁通减小的结果 任何电动机的电磁转矩都是磁通和电流互相作用的结果。电动机的电流大小要受到温升的制约，是不允许超过其额定值的。所以，如果主磁通 Φ_m 小了，会影响输出转矩的大小；

(2) 主磁通增大的结果 主磁通是由励磁电流产生的，两者之间的关系由磁化特性决定。主磁通 Φ_m 大了，会使电动机的磁路饱和，并导致励磁电流发生畸变。

2. 保持 Φ_m 不变的准确方法 在三相交流异步电动机中，主磁通 Φ_m 的大小与每相定子绕组的电动势 E_{1X} 及频率 f_X 有关：

$$\Phi_m = \frac{E_{1X}}{4.44 K_E f_X N} \quad (0-2)$$

式中， K_E 为比例常数； N 为每相绕组的匝数。

所以，保持 Φ_m 不变的准确方法就是使反电动势 E_{1X} 与频率 f_X 同步升、降，即满足

$$\frac{E_{1X}}{f_X} = \text{const} \quad (0-3)$$

3. 保持 Φ_m 不变的实际方法 由于 E_{1X} 的大小无法从外部加以控制，又因为在额定频率时，定子绕组的阻抗压降 ($\Delta U = I_1 z_1$ ， z_1 为定子绕组的阻抗，包括电阻 r_1 和漏磁电抗 x_1) 所占比例甚小，可以忽略不计。所以，在电动机内，电动势主要与电源相电压相平衡：

$$U_{1X} \approx E_{1X}$$

因此，作为一种替代手段，保持主磁通 Φ_m 不变的实际方法是，使电压 U_{1X} 与频率 f_X 同步升降来近似地代替反电动势 E_{1X} 与频率 f_X 的同步升降：

$$\frac{U_{1X}}{f_X} = \text{const} \quad (0-4)$$

所以，变频的同时也必须变压，这也就是变频器常被简称为 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 的原因。

2.2.2 VVVF 的实现

要实现 VVVF，虽然不像逆变电路那样强烈地依赖于开关器件。但简化到足以普及应用的阶段，却是在 20 世纪 70 年代提出了正弦脉冲宽度调制技术 (SPWM) 之后。而 20 世纪 80 年代以来，又由于计算机技术及大规模集成电路的飞速发展，使 SPWM 技术得到了长足的完善和进步。

1. SPWM 的含义 通过调节脉冲宽度和脉冲“占空比”来调节平均电压的方法，称为脉宽调制 (PWM)；如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布的话，便是正弦脉宽调制 (SPWM)，如图 0-2 所示。

2. SPWM 的调制特点 各逆变管导通与关断的时刻由正弦波 (调制波) 和三角波 (载波) 的交点来决定，如图 0-3 所示。

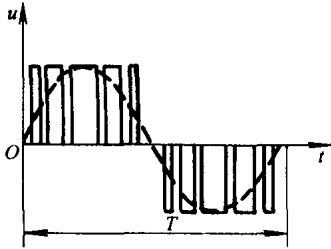


图 0-2 正弦脉宽调制的波形

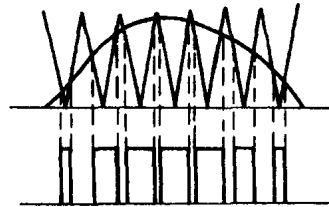


图 0-3 SPWM 波形的获得

变频时：

(1) 正弦波的频率随给定频率而变；三角波的频率原则上也跟着一起变化，但变化规律在不同品牌的变频器中不尽相同。

(2) 正弦波的振幅按比值 U_{1X}/f_X 和给定频率 f_X 同时变化；三角波的振幅则不变。

只有在微机技术高度发达的条件下，才有可能在极短的时间内实时地计算出正弦波与三角波的所有交点，并使逆变管按各交点所规定的时刻有序地导通和截止。

3. 载波频率与功率器件 SPWM 波形的载波（三角波）频率越高，电机绕组中的电流因纹波越小而越接近于正弦波。其载波频率的高低，取决于功率器件的开关速度。一般说来，当功率器件采用门极关断晶闸管（GTO）时，载波频率约为（600～1000）Hz；采用大功率晶体管（GTR）时，载波频率约为（1500～2000）Hz；而采用绝缘栅双极型晶体管（IGBT）时，载波频率可达（15000～20000）Hz。

2.3 机械特性至关重要

长期以来，直流电动机调速系统的机械特性一直是人们公认的佼佼者。所以，三相交流异步电动机变频调速系统的机械特性能否和直流调速系统相媲美，便成了变频调速系统能否覆盖全调速领域的试金石。

2.3.1 低频时异步电动机的机械特性

1. 满足式（0-4）的机械特性 在满足式（0-4）的情况

下, 所得到的机械特性曲线簇如图 0-4 所示。由图可知, 频率越低, 电动机的临界转矩越小, 带负载能力也越小。显然, 这样的机械特性是难于和直流调速系统相比的。

2. 低频时临界转矩减小的原因

当电压 U_{1X} 与频率 f_X 同步下降时, 电动机的额定电流 I_{1N} 及其电阻压降 $I_{1N}r_1$ 是基本不变的。所以, 随着 U_{1X} 的下降, 电阻压降 ΔU_r 所占比例逐渐增大, 而 E_{1X} 所占比例则逐渐减小。从而, 当 $U_{1X}/f_X = \text{const}$ 时, E_{1X}/f_X 实际上是随 f_X 的下降而减小的, 主磁通 Φ_m 也随之减小。结果是, 电动机的临界转矩 T_{KX} 也随之减小。

2.3.2 改善机械特性的方法和效果

迄今为止, 人们提出了许多种改善机械特性的方法, 效果都不错。在中小容量变频器中比较定型的方法主要有两种:

1. V/F 控制方式 如上述, 低频时有效转矩下降的原因, 是由于电阻压降 ΔU_r 在 U_{1X} 中所占比例增大。为此, 低频时, 在 $U_{1X}/f_X = \text{const}$ 的基础上适当提高 U_{1X}/f_X 的比值, 以补偿 ΔU_r 的比例增大的影响, 使式 (0-3) 所示的关系 ($E_{1X}/f_X = \text{const}$) 得到满足。这种方法称为转矩补偿, 也叫转矩提升。因为是通过改变 U/f 比值来实现的, 故通常称为 V/F 控制法。

V/F 控制方式如再配合变频器的转差补偿等功能, 就可基本上使异步电动机在低频时的机械特性和直流电动机不相上下了。

2. 矢量控制方式 矢量控制的基本思想是仿照直流电动机的调速特点, 使异步电动机的转速也能通过控制两个互相垂直的直流磁场来进行调节。其主要依据是:

(1) 产生旋转磁场的方法可以有多种: 如三相交变电流的合成磁场、两相交变电流的合成磁场以及本身旋转的直流磁场等;

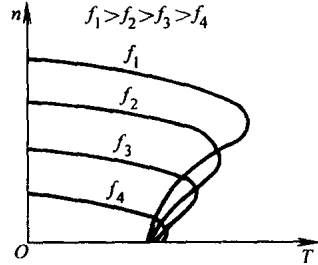


图 0-4 满足式 (0-4) 的机械特性

(2) 以所产生的旋转磁场相同为原则, 各种磁动势之间可以进行等效变换。例如, 两个互相垂直的旋转直流磁场系统可以和两相交流磁场系统等效变换、两相交流磁场系统又可以和三相交流磁场系统等效变换, 等。

因此, 对旋转着的两个互相垂直的直流磁场进行调节的控制信号, 可以等效地变换成对三相旋转磁场进行控制的信号。基于这样的思想, 将频率给定信号分解成两个互相垂直的直流磁场控制信号 (分别称为磁场分量和转矩分量), 结合电动机本身的结构数据和运行参数, 经过一系列的实时运算, 变换成等效的三相可控磁场信号, 用来控制逆变桥的工作。当给定信号改变时, 使直流磁场之一 (转矩分量) 得到调整, 从而获得和直流电动机相仿的调速特性。

矢量控制方式的提出和不断完善的结果, 使异步电动机的低频工作特性达到了十分完美的地步, 与直流电动机相比, 已经毫不逊色了。

20 世纪 90 年代, 又提出了“无反馈矢量控制”技术, 它可以在不需要转速反馈的情况下, 得到比较硬的机械特性。其调节范围和机械特性的硬度已能满足大多数用户的要求, 使变频调速的普及应用又推进了一大步。

3 变频器的额定数据和分类

3.1 变频器的额定数据

3.1.1 输入侧的额定数据

1. 输入电压 U_{IN} 即电源侧的电压。在我国, 低压变频器的输入电压通常为 380V (三相) 和 220V (单相)。此外, 变频器还对输入电压的允许波动范围作出规定, 如 $\pm 10\%$ 、 $-15\% \sim +10\%$ 等。

2. 相数 如单相、三相。

3. 频率 f_{IN} 即电源频率 (常称工频), 我国为 50Hz。频率的允许波动范围通常规定为 $\pm 5\%$ 。

3.1.2 输出侧的额定数据

1. 额定电压 U_N 因为变频器的输出电压要随频率而变，所以， U_N 定义为输出的最大电压。通常，它总是和输入电压 U_{IN} 相等的。

2. 额定电流 I_N 变频器允许长时间输出的最大电流。

3. 额定容量 S_N 由额定线电压 U_N 和额定线电流 I_N 的乘积决定：

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N \quad (0-5)$$

4. 配用电动机容量 P_N 在连续不变负载中，允许配用的最大电动机容量。必须注意：在生产机械中，电动机的容量主要是根据发热状况来决定的。在变动负载、断续负载及短时负载中，只要温升不超过允许值，电动机是允许短时间（几分钟或几十分钟）过载的，而变频器则不允许。所以，在选用变频器时，应充分考虑负载的工况。

5. 过载能力 指变频器的输出电流允许超过额定值的倍数和时间。大多数变频器的过载能力规定为：150%，1min。可见，变频器的允许过载时间与电动机的允许过载时间相比，是微不足道的。

3.1.3 输出频率指标

1. 频率范围 指变频器能够输出的最小频率和最大频率。如 (0.1~400) Hz, (0.2~200) Hz 等。

2. 频率精度 即输出频率的准确度。由变频器在无任何自动补偿时的实际输出频率与给定频率之间的最大误差与最高频率之比来表示。频率精度与给定方式有关，数字量给定时的频率精度约比模拟量给定时的频率精度高一个数量级。

3. 频率分辨率 指输出频率的最小改变量。分辨率的大小和最高工作频率有关。

3.2 变频器的类别

3.2.1 根据变流环节不同的分类

1. 交-直-交变频器 先将频率固定的交流电“整流”成

直流电，再把直流电“逆变”成频率任意可调的三相交流电。本书如无特别说明，均指此种变频器。

2. 交-交变频器 把频率固定的交流电直接转换成频率任意可调的交流电（转换前后的相数相同）。

3.2.2 根据直流电路的储能环节（滤波方式）分类

1. 电压型变频器 其储能元件为电容器。中、小容量变频器以电压型变频器为主。本书如无特别说明，均指此种变频器。

2. 电流型变频器 其储能元件为电感线圈。

3.2.3 根据电压的调制方式分类

1. 正弦脉宽调制（SPWM）变频器 电压的大小是通过调节脉冲宽度与脉冲占空比来实现的。中、小容量的通用变频器几乎全都采用此类变频器。本书如无特别说明，均指此种变频器。

2. 脉幅调制（PAM）变频器 电压的大小是通过调节直流电压幅值来实现的。

3.2.4 根据输入电源的相数分类

1. 三进三出变频器 变频器的输入侧和输出侧都是三相交流电。绝大多数变频器都属此类。本书如无特别说明，均指此种变频器。

2. 单进三出变频器 变频器的输入侧为单相交流电，输出侧是三相交流电。家用电器里的变频器均属此类，通常容量较小。

第 1 章 中小容量通用型变频器

(张燕宾等)

1 交-直-交电压型变频器的主电路

交-直-交电压型变频器是中小容量、通用型变频器的主要型式，其主电路如图 1-1 所示。它由交-直变换电路、直-交变换电路和能耗制动电路组成，今分述如下。

1.1 交-直变换电路

交-直变换电路就是整流和滤波电路，其任务是把电源的三相（或单相）交流电变换成平稳的直流电。其构成如下。

1.1.1 全波整流电路

1. 整流电路 在 SPWM 变频器中，大多采用桥式全波整流电路。在中、小容量的变频器中，整流器件采用不可控的整流二极管或二极管模块，如图 1-1 中的 $VD_1 \sim VD_6$ 。

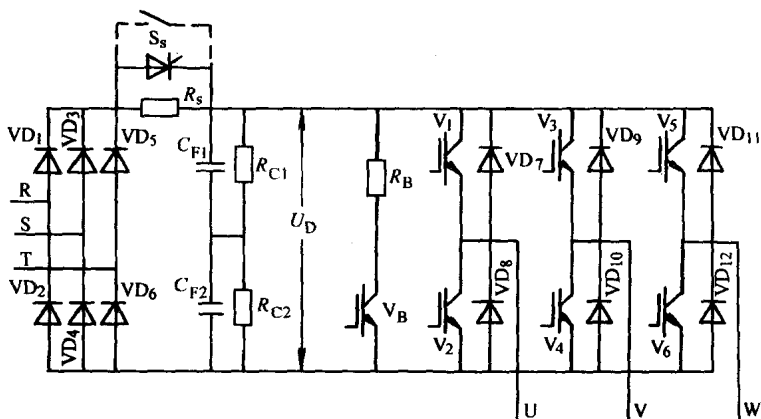


图 1-1 “交-直-交”变频器的主电路