



中华人民共和国国家标准

GB/T 21209—2007/IEC/TS 60034-25:2004

变频器供电笼型感应电动机 设计和性能导则

Guide for the design and performance of cage induction motors specifically
designed for converter supply

(IEC/TS 60034-25:2004, IDT)

2007-12-03 发布

2008-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
变频器供电笼型感应电动机
设计和性能导则

GB/T 21209—2007/IEC/TS 60034-25:2004

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 63 千字
2008年4月第一版 2008年4月第一次印刷

*

书号:155066·1-31160 定价 26.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

目 次

前言 Ⅲ

引言 Ⅳ

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 系统特性 2

4.1 概述 2

4.2 系统信息 2

4.3 转矩/转速因素 3

4.4 变频器控制类型 5

4.5 变频器输出电压 6

4.6 对电动机的要求 7

5 损耗及其影响 9

5.1 概述 9

5.2 电压源变频器供电的电动机损耗 9

5.3 附加损耗的产生和减少方法 10

5.4 变频器特性对降低电动机损耗的影响 10

5.5 温度和预期寿命 10

5.6 电动机效率的确定 10

6 噪声、振动和振荡转矩 11

6.1 变频器供电的感应电动机的噪声和振动 11

6.2 声功率级的确定及限值 12

6.3 振动烈度的确定及限值 13

7 电动机绝缘介电应力 13

7.1 概述 13

7.2 原因 13

7.3 绕组介电应力 15

7.4 绝缘应力承受能力 16

7.5 职责 16

7.6 变频器特性 17

7.7 降低电压应力的方法 17

7.8 电动机选择 18

8 轴承电流 18

8.1 变频器供电电动机轴承电流的来源 18

8.2 高频轴承电流的产生 18

8.3 共模电路 19

8.4 杂散电容 20

8.5 过量轴承电流的后果 21

8.6 防止高频轴承电流损害..... 22

9 安装..... 23

9.1 接地、搭接接地和布线 23

9.2 电抗器和滤波器..... 27

附录 A（资料性附录） 变频器输出频谱 29

前 言

本标准等同采用 IEC/TS 60034-25:2004《变频器供电的笼型感应电动机设计和性能导则》(英文版)。

本标准的附录 A 是资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国旋转电机标准化技术委员会(SAC/TC 26)归口。

本标准负责起草单位:上海电器科学研究所(集团)有限公司。

本标准参加起草单位:山东华力电机集团股份公司、武汉卧龙湖北电机有限公司、上海南洋电机有限公司、西安西玛电机有限公司、江苏锡安达防爆股份有限公司、无锡华达电机有限公司、浙江金龙电机股份有限公司、长江航运集团电机厂、威灵清江电机股份有限公司、江西特种电机股份有限公司、湘潭电机股份有限公司、闽东安波电器有限公司、中国北方机车车辆工业集团永济电机厂、江苏大中电机股份有限公司、河北衡水电机股份有限公司等。

本标准主要起草人:李秀英、顾卫东、张文斌、邓汉辉、岑兆奇、薄月琴、陆进生、吴国华、叶锦武、柏皓光、刘宇琼、吴冬英、李春林、韩顺虎、张彩霞、王荷芬、曹中水。

引 言

本引言的目的是为了说明本标准。

电动机的种类：

有两种类型的电动机可应用于变速驱动系统。

- 为一般用途设计的标准笼型感应电动机。这类电动机的设计和性能经过优化以适宜在恒频正弦波供电电压下运行。不过它们仍然适用于变速驱动系统。

GB/T 20161—2006 给出了在这些场合应用的导则。

- 为变频供电专用设计的笼型感应电动机。这类电动机的设计和结构以标准笼型感应电动机符合标准的机座号及尺寸为基础,但进行了一些改造以适宜变频供电运行。

本标准涵盖了此类型的电动机,并且在本标准中推荐使用基准值对电动机进行标记。

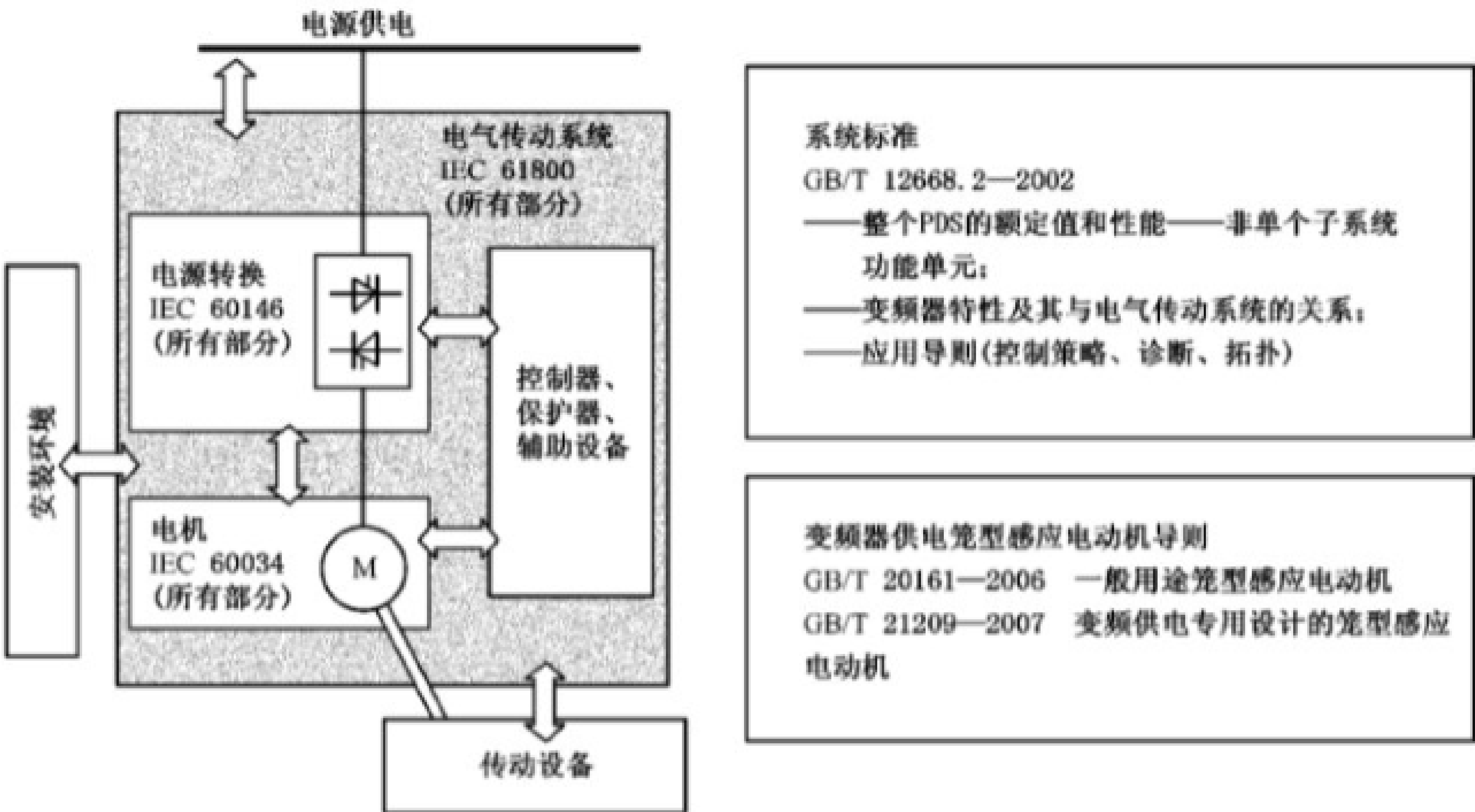
1 000 V 以上变频器供电的电动机或除了电压源供电的变频器,均在本标准的下一版考虑。

电动机与电气传动系统的整合：

图 1 为电气传动系统(PDS)的图解。电气传动系统由电动机和成套传动模块(CDM)组成,但不包括由电动机传动的设备。成套传动模块(CDM)由基本传动模块(BDM)及可能的外部扩展(例如馈电部分)或者一些辅助设备(例如通风装置)组成。BDM 含变频器、控制器及自保护功能。GB/T 12668. 2—2002 涵盖了整个 PDS 系统的额定值和性能。

注：GB/T 12668. 2—2002 中的图 1 提供了 PDS 系统详尽的结构参数。

IEC 60034 系列涵盖了与电气传动系统适当整合的电动机本体及其附加要求。



变频器供电笼型感应电动机 设计和性能导则

1 范围

本标准描述了 1 000 V 及以下电压源型变频器供电专用多相笼型感应电动机的性能特征和设计特点。本标准还规定了作为电气传动系统一部分的电动机和变频器之间的接口参数和相互作用,包括安装指南。

注 1: 电动机若运行于潜在爆炸性气体环境,应符合 GB 3836 系列给出的附加要求。

注 2: 安全性并非本标准的主要涉及内容,但其给出的一些建议牵涉到必须考虑的安全性问题。

注 3: 若变频器制造商给出了特定的安装建议,则应优先采用其建议,再参照本标准。

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—2000 旋转电机 定额和性能(idt IEC 60034-1:1996)

GB/T 755.2—2003 旋转电机(牵引电机除外)确定损耗和效率的试验方法(IEC 60034-2:1972, IDT)

GB/T 1993—1993 旋转电机冷却方法(eqv IEC 60034-6:1991)

GB 10068—2000 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(idt IEC 60034-14:1996)

GB 10069.3—2006 旋转电机噪声测定方法及限值 第 3 部分:噪声限值(IEC 60034-9:1997, IDT)

GB/T 12668.2—2002 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(IEC 61800-2:1998, IDT)

GB/T 12668.3—2003 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(IEC 61800-3:1996, IDT)

GB/T 20161—2006 旋转电机 第 17 部分:变频器供电的笼型感应电动机应用导则(IEC 60034-17:2002, IDT)

IEC 61800-5-1 调速电气传动系统 第 5-1 部分:安全要求 电气、热和能量

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

搭接接地 bonding

设备的金属部件的电气连接并接地。

注: 本标准中,该定义结合了 IEC 195-01-10(等电位连接)和 IEC 195-01-16(功能性等电位连接)中的要素。

3.2

变频器 converter

由一个或多个电子开关器件和相关的元器件,与变压器、滤波器、换相辅助器件、控制器、保护和辅

助部件(若有)组成的,用于改变一个或多个电气特性的电力变换用的工作单元。

注:这个定义取之于 GB/T 12668.2—2002,IEC 60034 这一部分中包含的成套传动模块(CDM)和基本传动模块(BDM)术语与 GB/T 12668 系列所述一致。

3.3

EMC(电磁兼容性) EMC(electromagnetic compatibility)

一个设备或系统能在其电磁环境中正常地运行而对该环境中的其他设备不产生过度电磁干扰的能力。

3.4

弱磁 field weakening

当电机磁通低于电动机相应的定额磁通时的一种运行模式。

3.5

峰值上升时间 peak rise time

从峰值电压的 10% 上升到 90% 之间的时间间隔(见图 14)。

3.6

电气传动系统 power drive system

PDS

由电力设备(包括变频器部分、交流电动机和其他设备,但不限于馈电部分)和控制设备(包括开关控制,如通/断控制,电压、频率或电流控制,触发系统、保护、状态监控、通讯、测试、诊断、生产过程接口/端口等)组成的系统。

3.7

保护接地 protective earthing

PE

为了电气安全将一个系统、装置或设备中的一点或数点接地。

3.8

越程带 skip band

当 PDS 稳态运行被抑制时的运行频率中的小波段。

3.9

表面传输阻抗 surface transfer impedance

同轴电缆外表面上的电流在同轴电缆中心导线上单位长度感应的电压份额。

4 系统特性

4.1 概述

虽然对任何应用场合规定电动机和变频器特点的方法都很相似,但最终的选择在很大程度上受到应用类型的影响。在本章中,叙述了这些方法并讨论了各种类型应用负载的影响。

4.2 系统信息

了解包括传动负载、电动机、变频器和电网电源的完整的系统信息是使系统中电动机达到要求性能的最佳方法。通常该信息应包含:

- 不同转速时的功率或转矩要求;
- 负载和电动机的期望转速范围;
- 受控过程中的加速度和减速度要求;
- 起动要求,包括起动次数和负载说明(折算到电动机轴上的转动惯量、起动时的负载力矩);
- 是连续应用过程还是起动、停止和速度变化的周期工作制应用;
- 包括了传动系统元件运行的环境在内的应用类型的一般说明;
- 电动机和变频器本身不能满足的附加功能说明(如:电动机温度监控、必要时变频器的旁路能力、特殊的时序回路或控制系统的基准速度信号);

- 可用的电源和布线说明,最终的配置将受所选择系统的要求影响。

4.3 转矩/转速因素

4.3.1 概述

图 2、图 3 和图 4 所示分别为变频器供电的笼型感应电动机的典型的转矩/转速特性、主要影响因素和其结果。根据电气传动系统的性能要求,可以设计出适应各种限值的不同类型的电动机。

注:图 2~图 4 没有示出可能的越程带(见 4.3.5)。

4.3.2 转矩/转速性能

图 2 所示为变频器供电的笼型感应电动机的转矩/转速性能。可获得的最大转矩受电动机定额和变频器电流限值的限制。在弱磁频率 f_0 和转速 n_0 以上,电动机可以恒功率运行,其转矩正比于 $1/n$ 。如果达到了最大转矩的最小值(正比于 $1/n^2$),则功率按 $1/n$ 比率降低,转矩按 $1/n^2$ 比率下降(扩充的区域)。最大转速 n_{max} 受机械强度和转子稳定性、轴承系统的速度承受能力和其他机械参数的限制。

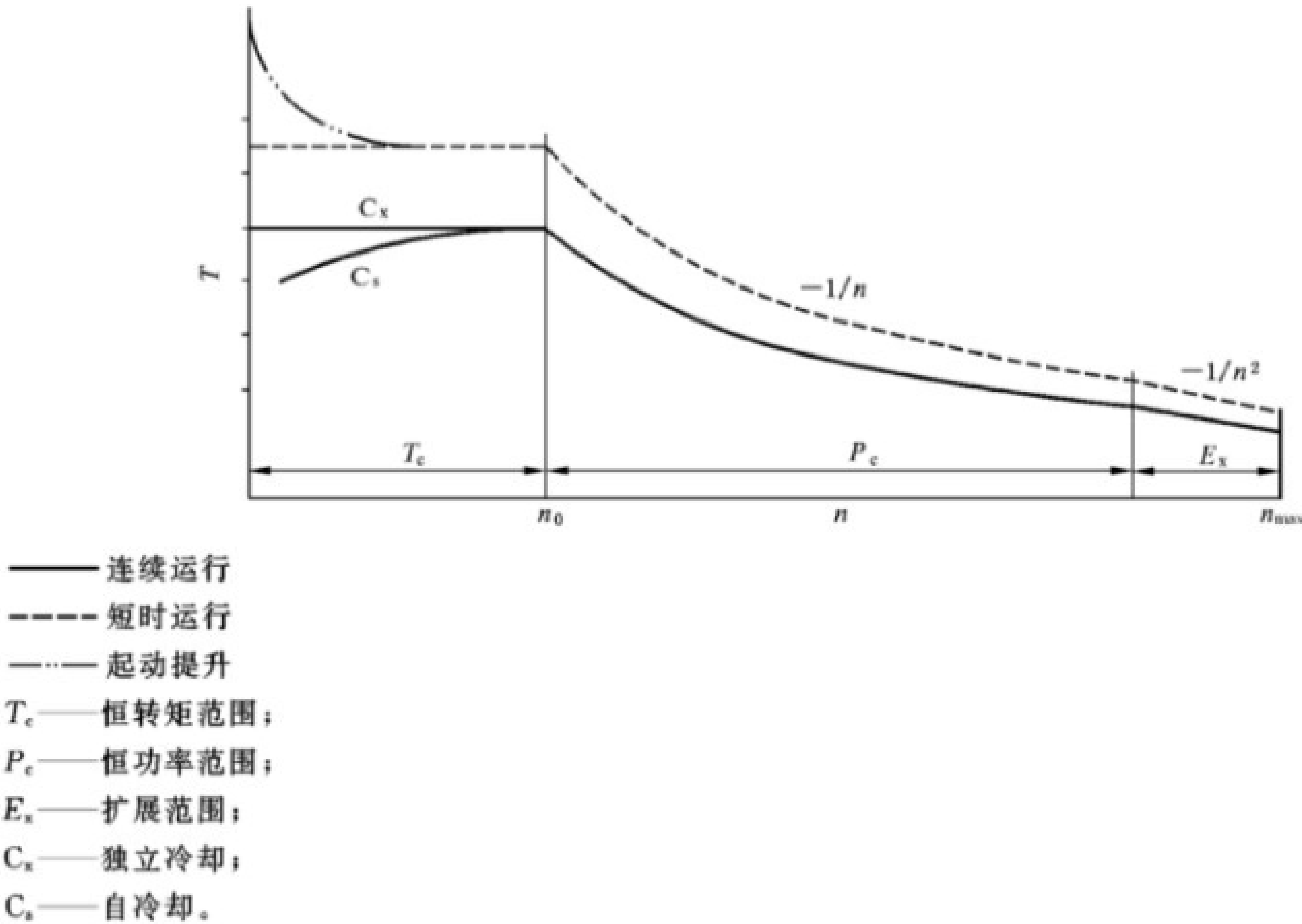


图 2 转矩/转速性能

图 3 所示为相应的变频器输出电流(I)性能。

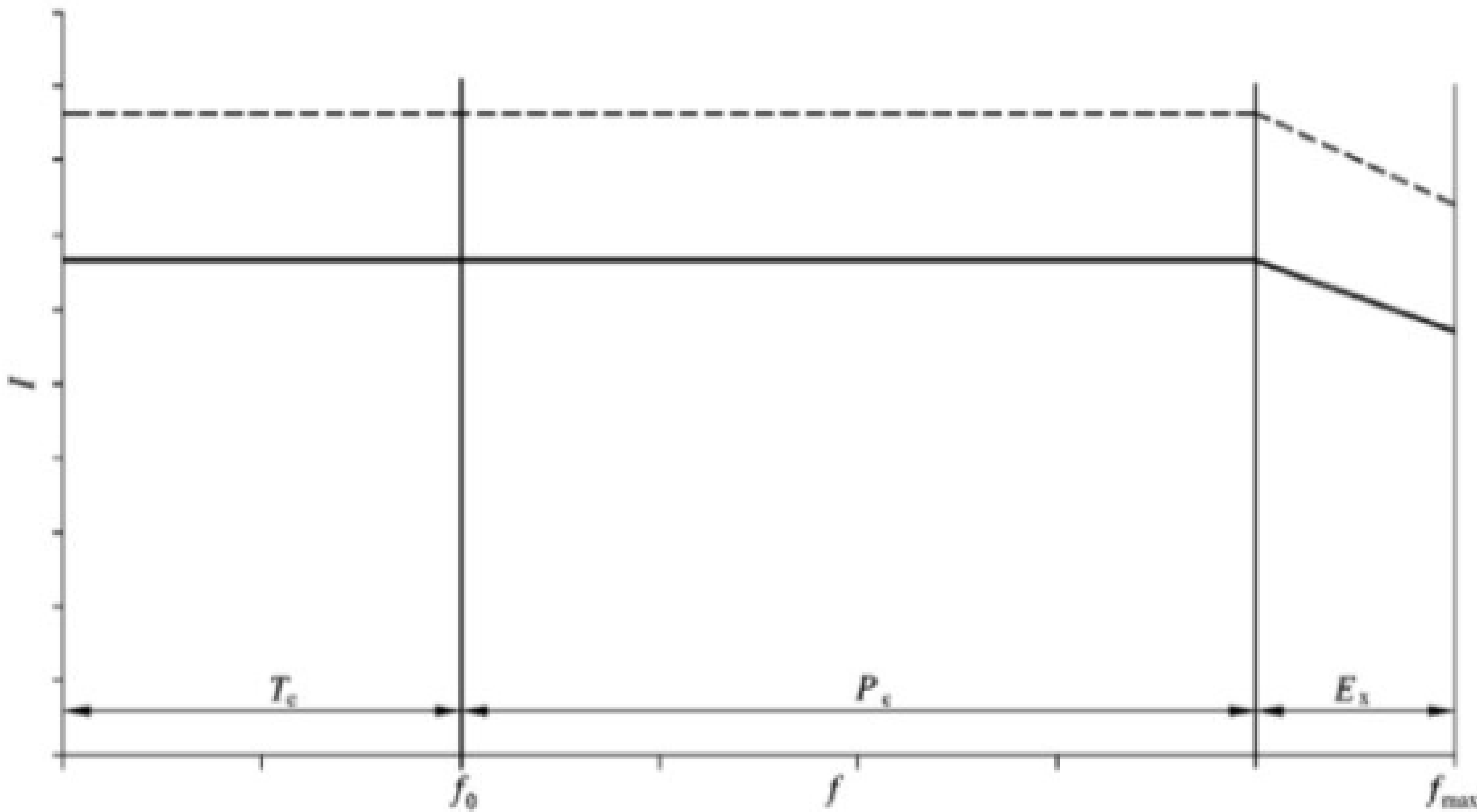
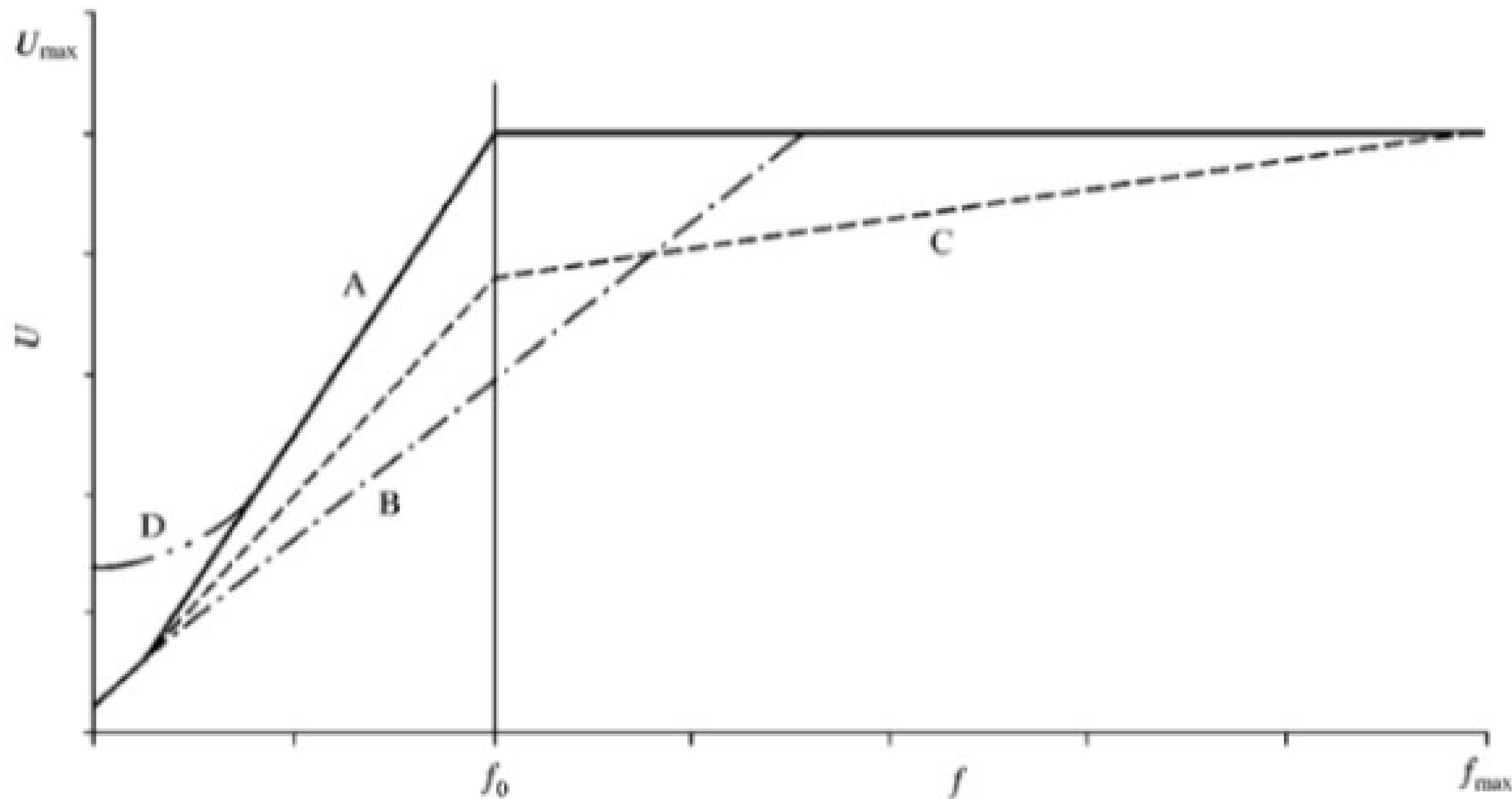


图 3 变频器输出电流

4.3.3 电压/转速特性

变频器输出电压(U)可按不同方式随转速变化,如图 4 所示。



- A——电压随速度增加而增加,在弱磁频率 f_0 时达到最大输出电压 $U_{\max}$;
- B——电压随速度增加而增加,在弱磁频率 f_0 以上达到最大输出电压 $U_{\max}$,这扩大了恒磁通的范围(恒转矩),但在这一速度范围内有效转矩减少;
- C——电压随速度增加而增加至弱磁频率 f_0 处,然后以缓慢的速率增长,并在 $f_{\max}$ 处达到最大输出电压 $U_{\max}$,以避免在恒磁通范围内出现过大的转矩降低;
- D——在低速时提高电压以改善起动性能。

在任意情况下,依据负载转矩-转速的要求,电压-转速的关系可能为线性或者为非线性。

图 4 变频器输出电压

4.3.4 转矩/转速性能的限制因素

表 1 所示为影响转矩/转速性能的主要因素。

表 1 影响转矩/转速性能的主要因素

状态	电动机	变频器和电动机
最初起动	最大磁通	最大电流
恒定磁通	冷却(电流变化的 I^2R 损耗)	最大电流
弱磁运行(降低磁通)	最高转速(机械强度及稳定性) 最大转矩值(最大转矩)	最高电压
动态响应	等值电路参数(模拟确定)	控制性能

4.3.5 越程带

变频器供电的电动机的转速范围内所包含的某些速度会使电动机定子、电动机/负载的轴系统或从动设备的部件产生共振。通过变频器的设置,有可能跳过这些共振频率。然而,即使跳过了共振频率,当电动机运行于该共振转速之上的任何转速时,仍将带动负载加速经过该共振速度。减少加速时间有利于减少共振时间。

4.3.6 工作制

4.3.6.1 概述

在各种工作制运行中,负载或转速经常变化(见 GB 755—2000),会在一些方面影响电动机和变频器。

- 电动机散热随转速和冷却方式而变化。
- 可能要求电动机的转矩大于满载转矩。为了加速、操纵最大负荷甚至使负载减速,可能要求电动机高于满负荷运行。高于额定电流运行将增加电动机的发热。当电动机过载时需要采用比

额定更高温度的绝缘等级或对电动机所运行的工作制进行评定以确定电动机是否具有足够的冷却能力(见 GB 755—2000, S10 工作制)。

- 为使电动机减速,可能要采用直流制动、能耗制动或再生制动。无论电动机产生转矩驱动负载或电动机由负载驱动产生能量回馈至变频器,还是在减速时给绕组通以直流电以提供制动转矩,电动机的发热都近似与电流平方成比例。工作制分析时应包含该发热。而且,制动时在轴上产生的瞬态转矩应控制在不致使电动机损坏的程度。

注: IEC 61800-6 给出了负载工作制的信息和整个 PDS 的电流确定。

4.3.6.2 高冲击负载

高冲击负载运行是一种特殊的工作制,出现在特定的间歇转矩应用中(例如,GB 755—2000, S6 工作制)。在这些应用中,电动机快速加载或卸载。该负载转矩有可能是正的(与电动机旋转方向相反),也有可能是负的(与电动机旋转方向相同)。

这种高冲击负载将导致电动机所需的电流(来自于变频器)迅速增加或减少。如果该转矩是负的,电动机会回馈电流至变频器。这些瞬态电流在定子绕组中产生应力。该瞬态电流的大小是变频器和电动机容量的函数。

4.4 变频器控制类型

4.4.1 概述

变频器有多种控制类型:标量控制、矢量控制(无传感器或反馈控制)、直接磁通转矩控制等。每种类型都具有不同的特性,在 4.4.1.1~4.4.1.3 中进行了说明。

4.4.1.1 标量控制

在电压/频率变频器中标量控制是最初的概念。在这种变频器中,根据输出频率控制输出电压。图 4 所示为各种实现方法的例子。

当变频器输出电压与频率成比例时,即使没有速度反馈信号电动机也近似恒磁通运行。

通常采用电压提升(在变频器输出电压上增加一个固定电压)、即常规的电压补偿(定子绕组电阻压降)或超前的动态电压补偿的方法来提高低速区的起动和运行性能。

当电动机电压较低时,在低速区提升电压效果较好,但应确保电压提升后不使电动机磁路饱和。

当电动机轻载时,电压提升量与电动机的电流大小成比例,电压补偿可改善其性能。许多标量控制采用特殊的算法对由电动机定子电阻和电感造成的电压降进行动态补偿。在低速区,这种方法对改善电动机的起动和运行性能更加有效,且通过附加的电机电压和电流反馈信号,即使在较低频率区,这种控制也能使电动机产生与矢量控制相近的转矩值。

标量控制通常用于对转矩或转速指令快速响应无要求的场合(如离心泵和风机),尤其适用于单台变频器给多台电动机供电的场合。

4.4.1.2 矢量控制

交流矢量控制变频器本质上是对产生电动机的磁通和转矩的定子电流进行分解,以便分别加以控制。

无论是否具有速度反馈信号,都可通过等效电路(数学模型)对电动机特性进行计算而实现电流分解。

可根据电动机的性能要求水平,采用不同的近似方法进行等效电路计算。此外,利用速度反馈(传感器)信号可进一步改善电机性能。

4.4.1.3 直接磁通转矩控制

直接磁通转矩控制变频器具有滞后(即“滑模”)控制型式,无论是否采用速度反馈信号,都通过电动机的数学模型计算调整其磁通和转矩。

这种控制类型中没有调制器,变频器中每个功率半导体的开关切换都是独立的。此外,利用速度反馈(传感器)信号可进一步提高电机性能。

这种控制类型的基本原理是使电动机以尽可能快的速度达到所要求的转矩和转速。

4.4.2 变频器类型选择

上述三种控制类型都适用于恒转矩应用和转矩随转速而增加的情况(如离心泵或风机)。然而,选择变频器时应考虑到每一项性能要求以确保达到最佳运行状态。

通常,应注意以下方面内容。

- 标量控制可用于一台变频器给多台不同定额的电动机供电并联运行的场合(多电机运行)。
- 虽然可通过动态电压补偿提高低速运行时的性能,但标量控制还是不能满足低速负载运行要求(约低于10%基准速度)。
- 通过动态电压补偿可使标量控制下的稳态转矩能力与无传感器矢量控制等同。
- 标量控制和矢量控制或直接磁通转矩控制之间最显著的差别在于动态响应。
- 如果需要满足以下一项或多项特性要求,则需采用矢量或直接磁通转矩控制:
 - 零转速附近运行;
 - 精确的转矩控制;
 - 低速时产生峰值转矩。
- 矢量控制或直接磁通转矩控制,可用于多台相同定额电动机运行,可带或不带速度反馈。
- 矢量控制与直接磁通转矩控制的特性几乎相同,因为两者都用电动机数学模型计算,可带或不带磁通或转速传感器。

更为详尽的内容参见 GB/T 12668.2—2002。

4.5 变频器输出电压

4.5.1 脉宽调制(PWM)

PWM 适用于由“载波频率”同步控制器(“调制器”)控制变频器的转换切换而输出电压的方案。

调制器控制变频器的输出转换模式,使其输出电压与目标值相等。

注:输出电压是指对应于开关频率的电压的平均值和对应于变频器基本输出频率的电压的瞬时值。

载波频率可与工频或输出频率同步。选择适当的载波频率可以减少电动机的损耗、电流纹波或噪声,也可使载波频率保持波动(“摆动”或“随机”PWM)以使输出电压的谐波频谱分布于较宽的范围。

此外,可应用特殊的控制技术优化电流波形或频谱,如使电流峰值最小或消除某些谐波。

4.5.2 滞后(滑模)控制

滞后控制适用于由“非载波频率”(非同步)控制器控制变频器的转换切换而输出电压的方案。一旦控制参数的实际值与基准值之差超过一定值时即进行转换切换。

滞后切换可具有多个控制参数:电压、电流、磁通或转矩,取决于控制型式。

4.5.3 开关频率的影响

变频器的输出开关频率将影响(电动机和变频器中的)损耗和整个系统的噪声及转矩脉动。虽然不可能给出这些影响的精确值,但图 5、图 6 和图 7 以一般的方式进行了表示。这些图仅用于说明,不能进行比较计算。

注 1:在图 5 中,纵坐标表示的电动机损耗和变频器损耗不同。变频器损耗通常低于电动机损耗。

注 2:对于不采用固定载波频率的调制方案,“开关频率”是指平均每秒切换脉冲的次数。

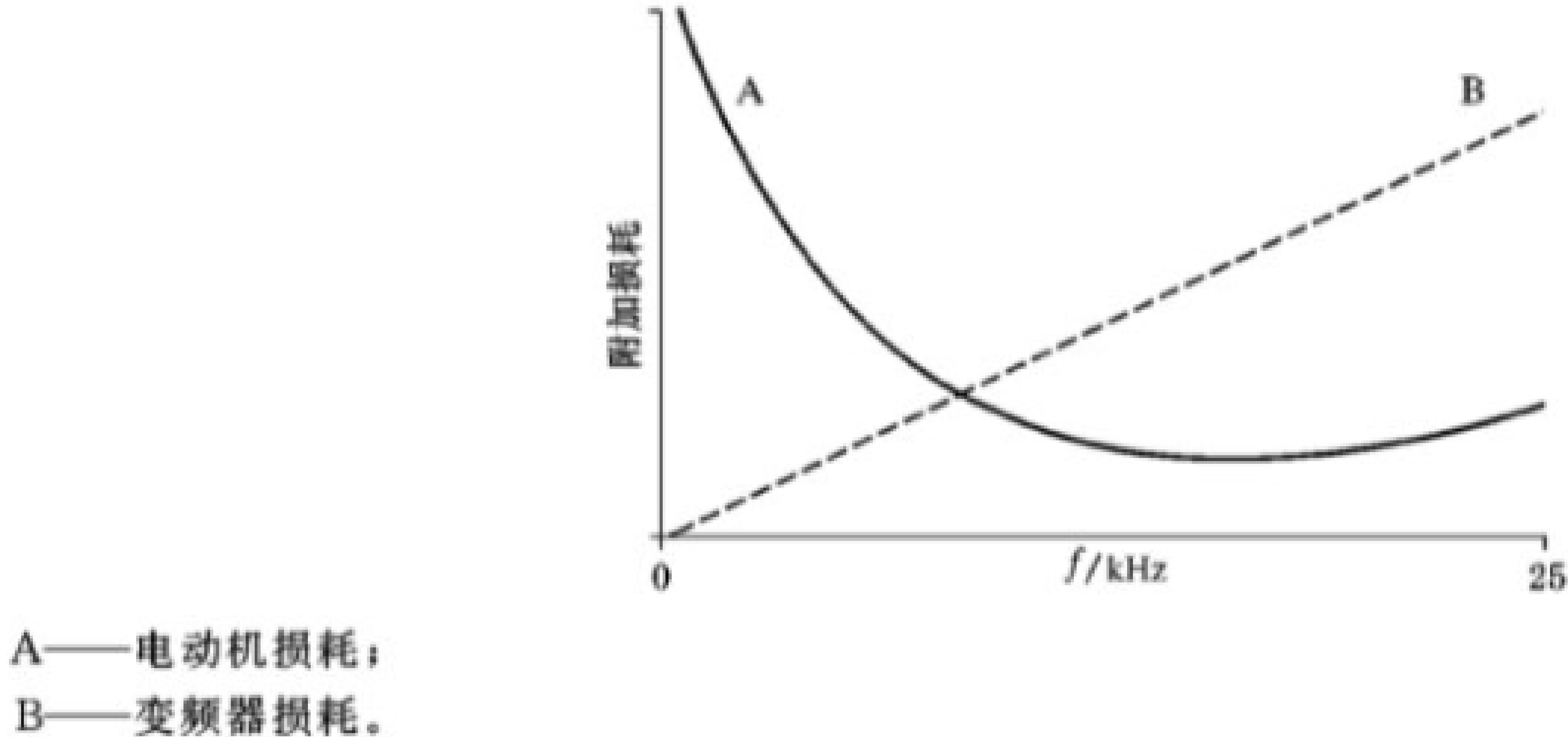


图 5 开关频率对电动机和变频器损耗的影响

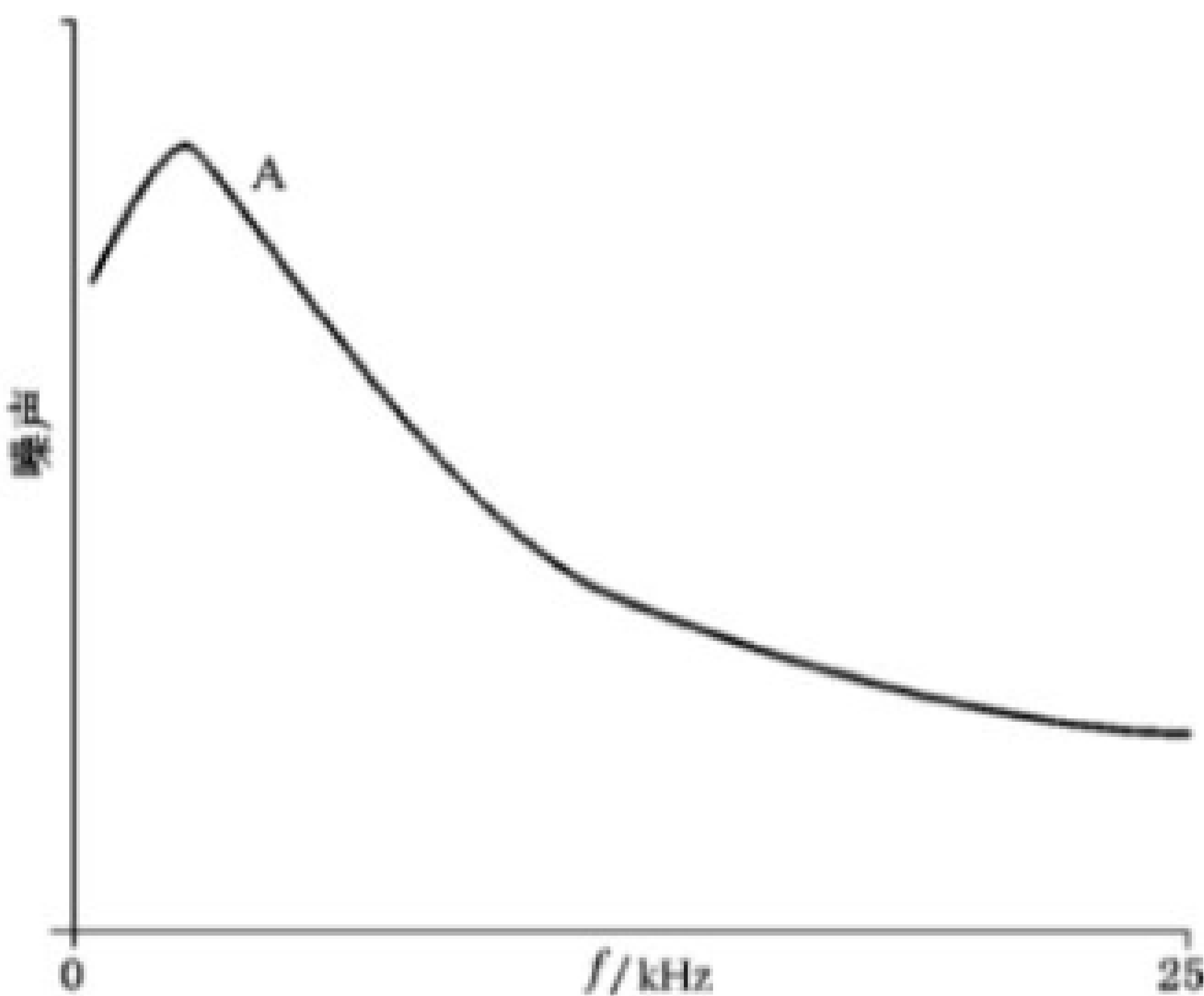
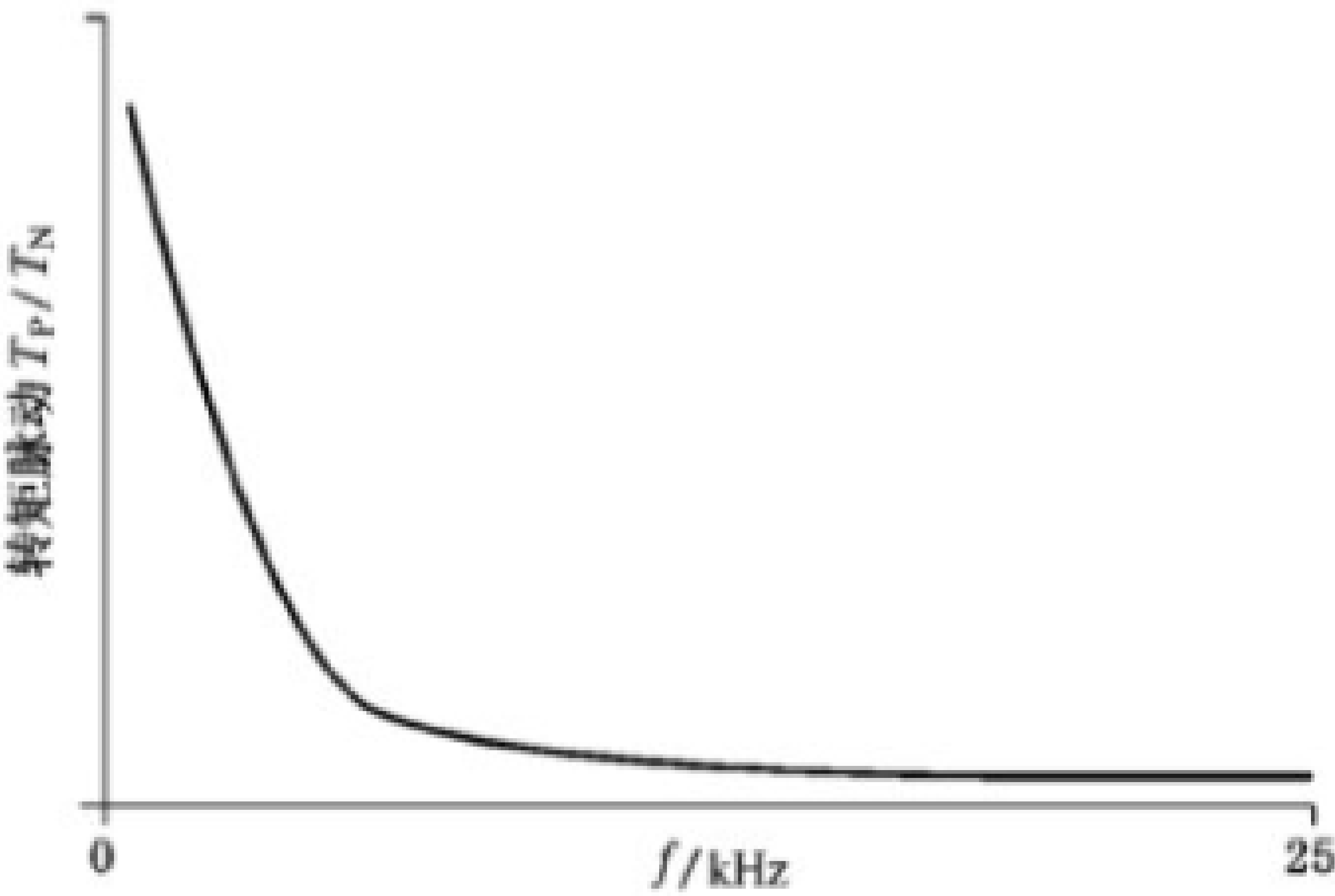


图 6 开关频率对噪声的影响



T_p ——脉冲转矩的峰值；
 T_N ——额定转矩。

图 7 开关频率对转矩脉动的影响

4.5.4 多电平变频器

在上述两电平变频器方案中，其输出电压由直流总线电压的正、负电平之间的切换产生。
多电平变频器提供中间电位作切换，因此谐波频谱幅值显著降低并移向较高频率。

注：由于多电平变频器要使用更多的开关半导体器件，因此更多地用于高电压场合（见 GB/T 12668.4—2006）。

4.6 对电动机的要求

表 2 所示为一些主要的要求和设计考虑。

表 2 电动机设计考虑的因素

应用要求	设计需要考虑的事项
长期低速运行	热裕度要大或用强迫冷却 轴承长期运行于 10% 基速以下，滑动轴承性能要由制造厂确认
大调速比	采用冷却效果与转速无关的冷却方式（独立风扇或其他冷却介质，如水冷）
速度反馈装置	防止机械相碰 速度传感器需电气绝缘
高速（弱磁）运行	机械方面的考虑 提高最大转矩（即漏抗要小） 在弱磁运行区，电压/频率特性达到最大
提高变频器供电时电动机效率	笼型转子设计（不用深槽，见 5.3） 不考虑直接启动和旁路能力

表 2(续)

应用要求	设计需要考虑的事项
有旁路或直接起动能力	适当的笼型转子设计,然而该设计对降低损耗和改善效率并不利,需要综合考虑
起动转矩高	如可能,在接近零频率处磁通增加 10%~40%(取决于电动机尺寸)
变频器或滤波器或接线电缆引起电压降	用合适的电动机额定电压补偿这些电压降
常用转速下多台电动机近似同步化运行	各台电动机要有类似的转矩-转差特性

在某些应用场合为使电动机与变频器匹配,要求电动机设计者提供如表 3 所列的电动机参数。

表 3 电动机参数

参数	说明/解释	标量控制	矢量控制或直接磁通 转矩控制
最大值			
最高转速		要求	要求
定转子绕组最高温度		要求	要求
声学参数			
为避免电动机谐振,变频器 应越过的频率		要求(如果出现离散载波频率时)	
机械参数			
转动惯量	对高的加速速率	可选	可选
风摩擦转矩与转速的 多项式关系 $m=k_1n+k_2n^2$	对要求准确确定输出机械功率 的某些自动线或生产作业	可选	可选
T 型等值电路电气参数			
定子电阻(R_s)	工作温度下	可选(对电压补偿)	要求
转子电阻(R_r')	工作温度下	可选(对改进标量控制)	要求
定子漏抗($X_{s\sigma}'$)	基频下	可选(对改进标量控制)	要求
转子漏抗($X_{r\sigma}$)	额定运行状态下, 不同于堵转状态	可选(对改进标量控制)	要求
励磁电抗(X_m)	基频及额定运行状态下	可选(对改进标量控制)	要求
励磁电导(G_m)	基频及额定运行状态下	可选(对改进标量控制)	要求
励磁感抗特定多项式	对弱磁运行	要求(对改进标量控制)	要求
转子挤流效应(如梯形导体)	要求快速电流响应和精确 动态控制时,准确确定谐波 损耗和温升	可选	可选
定子挤流效应(如梯形导体)		可选	可选
注:转子电气参数 R_r' 和 $X_{r\sigma}'$ 是以定/转子匝数比的平方折算到定子边回路的值。			

在低速下要求精确控制的高转矩应用场合,为改进其热模型而提供电动机内部热容量和部件热阻数据对电动机设计者是有用的,这些参数与转速和开关频率有关。

5 损耗及其影响

5.1 概述

变频器以非正弦波供电时电动机内除由基波电压和电流产生的损耗外,还会产生一些附加损耗。这些附加损耗取决于电动机的转速、电压和电流、变频器输出电压波形和电动机的设计和大小。如果没有串联电感和滤波器,这些附加损耗将达到基本损耗的 10%~20%,即占电动机额定输出功率的 1%~2%。

附加损耗的大小和特性取决于变频器类型、参数及电动机和滤波电路的设计。

5.2 电压源变频器供电的电动机损耗

电压源变频器施加电压至所联接的电动机。由于输出切换,接近理想形状的平均电压由一个陡斜率且幅值接近恒定的准方波电压平均而来(带中间直流回路的两电平变频器施加的是中间直流回路电压的峰—峰值)。由于该“脉冲电压”的幅值和频谱恒定,电动机损耗几乎与电流、转速和磁通(电压)无关,类似于空载损耗。电动机磁路饱和(由磁通或电流所引起)对附加损耗的影响很小。

图 8 所示为一台由 50 Hz 正弦波和 5.5 kHz 电压源变频器供电的 37 kW、50 Hz 电动机在空载和满载时的损耗。

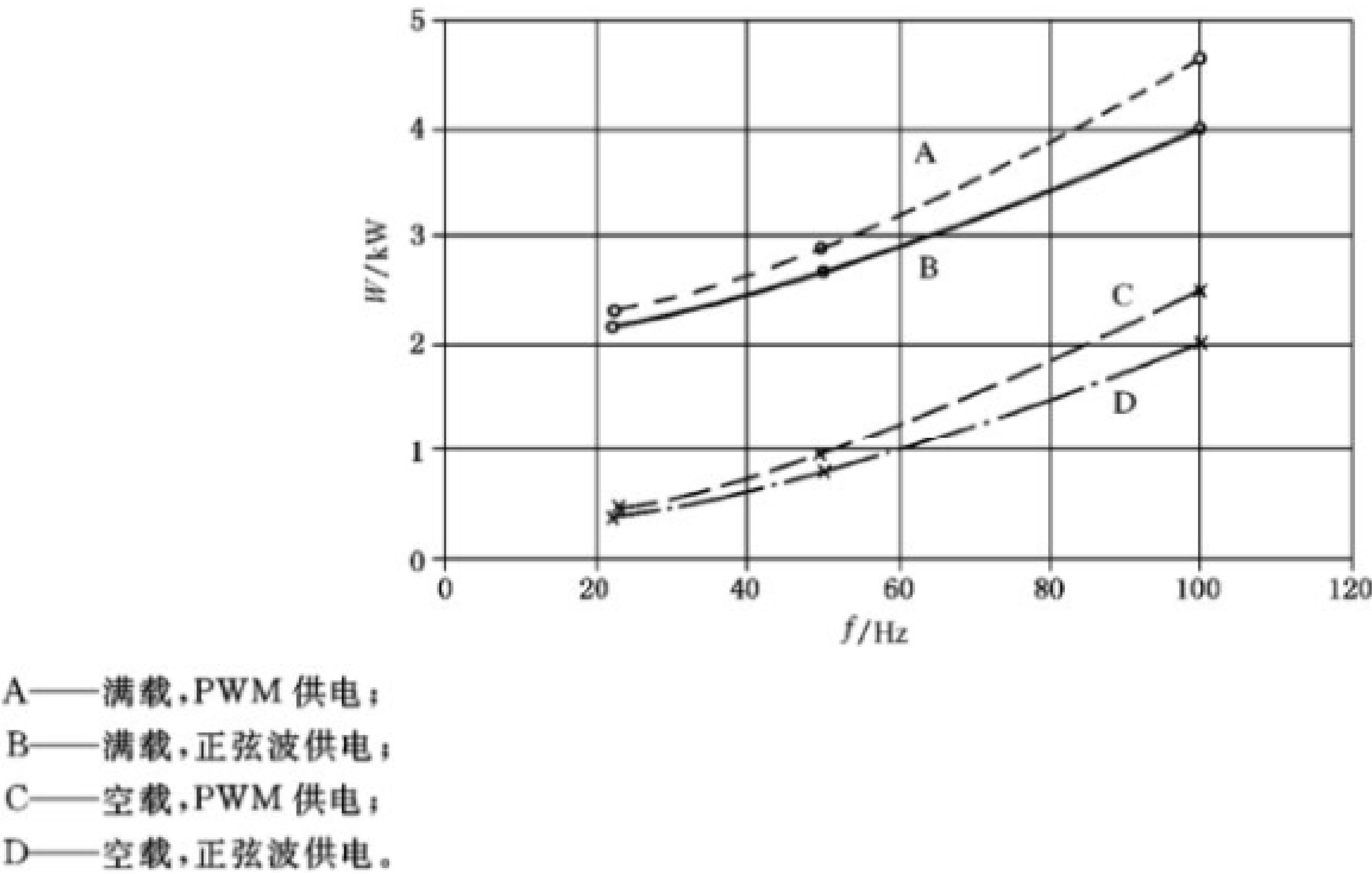


图 8 损耗与频率和供电电源类型的函数关系实测值(实例)

直到数千赫兹,附加损耗随脉冲频率的增加而显著下降(见图 9)。

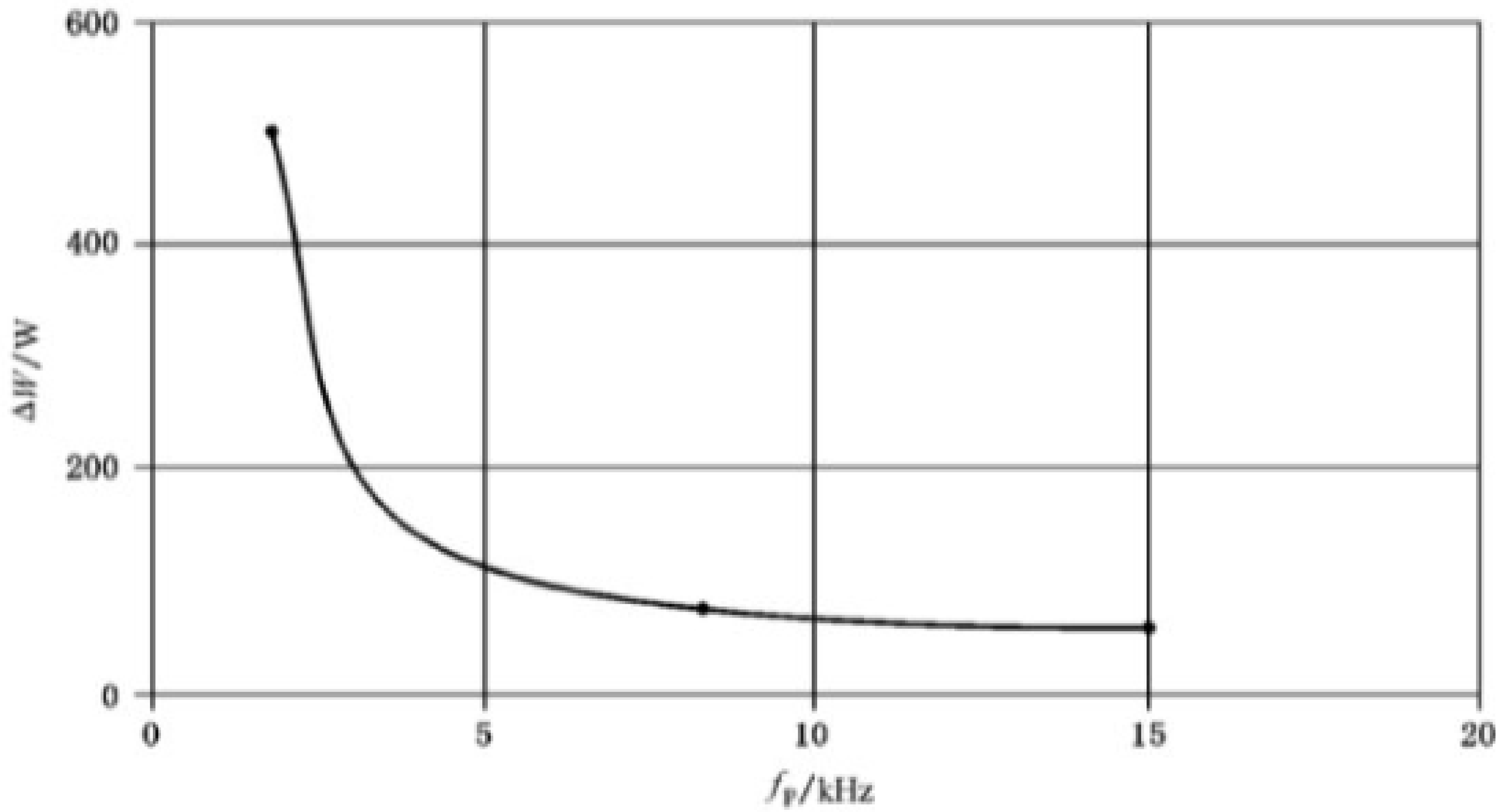


图 9 50 Hz 时由变频器供电引起的电机附加损耗与脉冲频率的函数关系(与图 8 相同电动机)

然而,变频器中的换向损耗随脉冲频率的变化而增加,在数千赫兹时总损耗为最小值。

由变频器供电而引起的附加损耗的典型数值范围如下(随电动机容量增大而减小):

- 两电平变频器为额定输出的 0.4%~2%;和
- 三电平变频器为额定输出的 0.2%~1%。

该附加损耗随磁通(电压)和转矩(电流)的变化较小,而主要取决于开关频率和基频。对于滞后或随机 PWM 控制变频器,也可采用与电压和电流有关的开关平均频率。

5.3 附加损耗的产生和减少方法

变频器输出电压近似为准矩形电压脉冲而组成的正弦波形。对这些脉冲来说,电动机表现为一个与频率有关的阻抗,其损耗主要由导体(主要为转子导条,某些情况下也包括定子导体)中的集肤效应和漏磁通路径(尤其是铁心叠片)中的涡流损耗产生。

由电压源变频器供电而产生的附加损耗可通过以下多种方法使其减小:

- 转子设计时减小集肤效应;
- 转子槽开口;
- 避免转子铁心叠片的片间短路;
- 采用更薄的定、转子铁心叠片以减小涡流损耗;
- 减少串联电抗器或滤波器中的涡流损耗。

5.4 变频器特性对降低电动机损耗的影响

由于基本损耗比附加损耗大得多,而根据负载情况对电动机磁通进行优化(例如,在部分负载时降低磁通)可减小基波损耗,因此可显著降低电动机的损耗。也可通过改变中间直流电压降低基本损耗。

注 1: 若所要求的转矩为速度的函数,如水泵和风机(转矩与速度的平方成比例)类负载,该方法比较适用。对于其他的应用场合,要谨慎考虑。

通过如下方法可减小变频器输出电压的谐波分量以降低附加损耗:

- 优化脉冲波形。
- 提高开关频率(见图 9)。

注 2: 提高开关频率会增大变频器中的开关损耗(见图 5)。

- 配置多电平变频器。

5.5 温度和预期寿命

由负载状况及电压波形所引起的基本损耗和附加损耗的总和使得电动机绕组产生温升。该温升还受规定速度范围内工作点的冷却状况变化的影响。

有如下几种方法有助于解决对电机温升的影响:

- 对空冷电动机采用独立风机冷却,如 IC0A6 或 IC1A7(见 GB/T 1993—1993);
- 提高绝缘耐热等级(见 GB 755—2000);
- 对运行环境温度进行完全补偿(见 GB 755—2000);
- 选用更大容量的电动机;
- 优化变频器输出波形。

注: 温度升高不仅影响绕组绝缘,还影响轴承润滑,从而影响轴承寿命。

负载和转速的变化对绕组温度的影响用 GB 755—2000 中确定的工作制来表征。工作制 S1—S9 考虑到最高温度,而工作制 S10(变负载和变转速运行)允许温升在有限的时间内超出绝缘耐热等级的限定值。GB 755—2000 给出了温升限值,其附录 A 给出了预期热寿命的计算公式。

5.6 电动机效率的确定

GB/T 755.2—2003 中的 A.1.6 给出了确定电动机效率的推荐方法。对于功率在 50 kW 以上的电动机宜采用损耗分析法。

注: GB/T 755.2—2003 的更新版本可能会把 50 kW 改成 150 kW。

测量空载损耗(包括附加损耗)时所施加的脉冲频率和波形应与变频器在额定负载时产生的脉冲波

形和脉冲频率相同。

6 噪声、振动和振荡转矩

6.1 变频器供电的感应电动机的噪声和振动

6.1.1 概述

变频器及其作用产生三个直接影响噪声发射的变量。它们是：

- 转速从接近零到超过基速变化。这将会影响轴承和润滑、通风和其他任何受温度变化影响的特性。
- 电动机电源频率和谐波分量对其定子铁心中产生的电磁噪声其次是轴承噪声有很大影响。
- 由电动机气隙磁场中的不同频率的波相互作用而引起的扭转振荡。

6.1.2 由速度变化而引起的噪声发射变化

6.1.2.1 套筒(或滑动)轴承

对滑动轴承,转速变化时其发射的噪声级无显著变化。

6.1.2.2 滚动轴承

滚动轴承潜在的发射噪声基频直接随转速变化。如果轴承在基速时“寂静”,那么当速度减小时,其噪声级不会有显著变化。然而,当速度超过基速时,由于滚动零件间滑动加剧了基频谐波而导致轴承噪声显著增大。当速度因子(轴承直径 mm×转速 r/min)大于 180 000 时,对这一现象的敏感度迅速增加。经验表明,缩短加油时间间隔或用油浴或油雾补充轴承润滑剂可抑制噪声的增加。

当电动机运行于转速范围中的最高转速时,其轴承温度比运行于较低转速时高。因此,在设计时确保有足够的标称间隙和/或具有弹簧加载装置就尤其重要。

在低速运行时,润滑脂润滑的轴承性能相当好。

6.1.2.3 通风噪声

对于安装于轴上的风扇,其产生的噪声变化近似如图 10 所示(风扇圆周线速度小于 50 m/s)。转速降低 50%,风扇噪声约降低 15 dB;转速增加 50%,风扇噪声增加约 10 dB。如为单方向传动,电动机用单向叶片风扇对降低噪声非常有效。

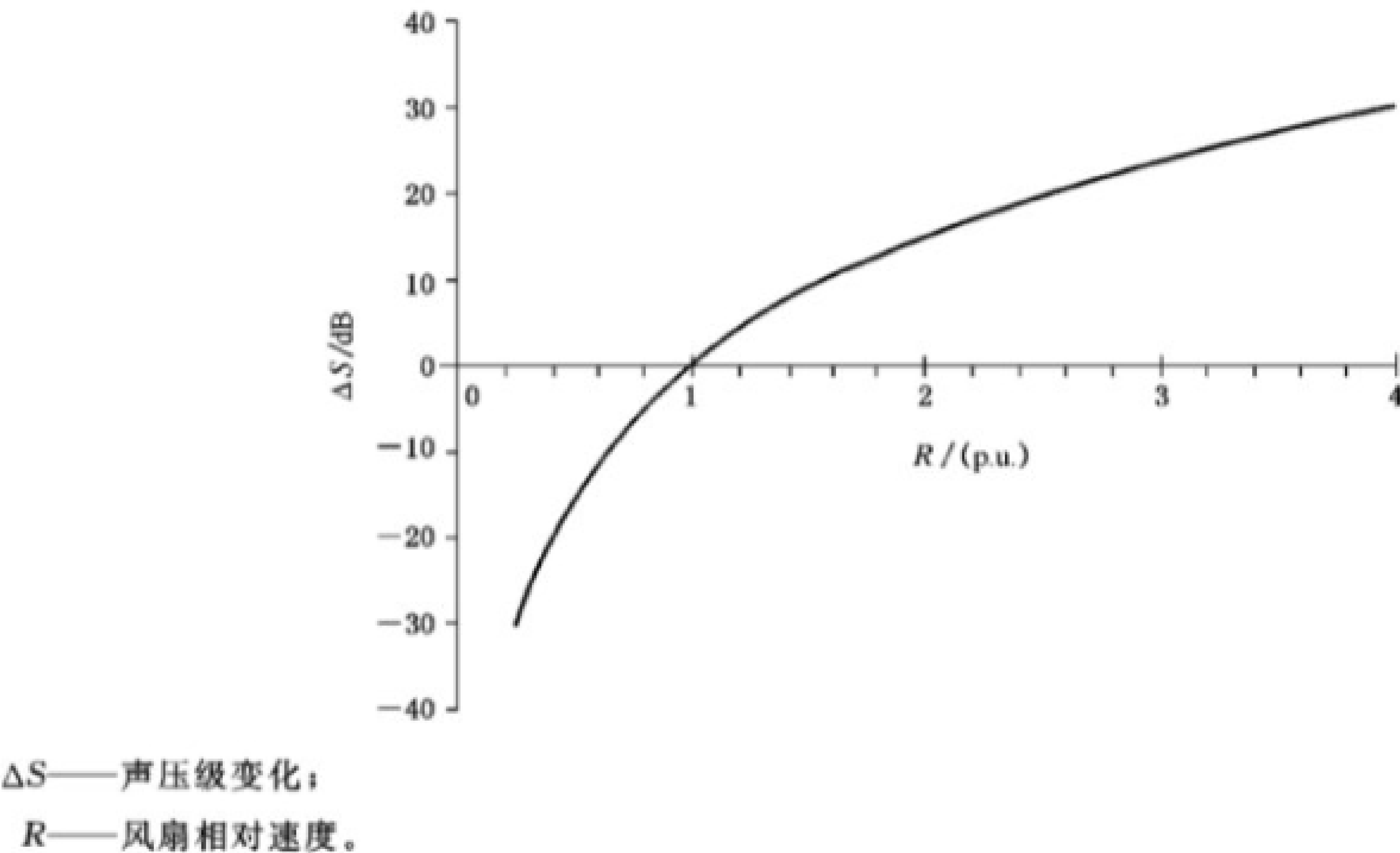


图 10 风扇噪声与风扇速度的函数关系

6.1.3 磁励噪声

当电动机在宽速度范围运行时,由于供电频率的变化出现谐振是不可避免的。不仅是变频器供电时会出现这种现象,当由变频正弦波电压供电时,也会出现这种情况。

当电动机由变频器供电时,还应考虑由定转子电流的时间谐波引起的空间变化基波磁场与电动机结构的相互作用激发的磁励噪声。PDS 设计者力求找出解决噪声问题的最佳方案,但必须意识到只有靠变频器和电动机设计者相互合作才能达到目的,单独依靠任何一方都无法解决问题。

电压源变频器对不同频率的正弦电压波形进行原始合成产生了大量的电压谐波分量,从而在定转子中产生了电流谐波分量,其幅值和频率取决于变频器脉冲控制情况和电动机的参数。经验表明,当脉冲频率小于 3 kHz 时,谐波频率接近于大中型电动机铁心和结构的自然频率,因而在宽调速范围应用场合,在运行速度范围内不可避免地会在一些运行点出现谐振。对于轴中心高大于 315 mm 的 2、4 极电动机, $r=0$ 和 $r=2p$ 模式的谐振频率低于 2.5 kHz。相反,随着变频器脉冲频率增高至 4 kHz 或 5 kHz 甚至更高时,谐振将会出现于更小的电动机中。

同一台电动机由 PWM 控制变频器供电和由正弦波供电相比较,当开关频率高于 3 kHz 时,前者的噪声增量较小(仅几 dB(A));当开关频率较低时,前者的噪声增量很大(可达 15 dB(A))。一些先进的 PWM 或滞后控制变频器不再使用固定的载波频率而产生非基频的宽频谱,典型噪声增量和主观可听噪声都会大大降低。

某些情况下有必要在调速范围内设置越程带以避免因基频而发生谐振。

6.1.4 扭转振荡

变频器供电的电机会在轴上产生振荡转矩。转矩脉动的幅值和频率可在完整联接的机械系统中产生扭转振荡,为了避免发生破坏性的机械谐振应进行仔细核查。

电压源 PWM 变频器低脉冲频率(小于 200 Hz)时振荡转矩可达额定转矩的 50%,与输出电压谐波含量有关。当脉冲频率高于 2 kHz 时,起重要作用的 6 倍和 12 倍基频振荡转矩往往小于 10%的额定转矩。

变频器输出电压不对称引起的直流分量和负序分量会产生 1 倍或 2 倍基频转矩分量,应小心预防。考虑到对直流分量仅是电阻起作用而对负序分量是短路阻抗起作用,因此很小的不对称电压将产生相当大的不对称电流,从而出现振荡转矩,特别是与轴系谐振频率相近时,由于齿轮组、联轴器或一些轴的联接中存在间隙,会在转矩传递表面分离并发生机械冲击而导致损坏。

6.2 声功率级的确定及限值

6.2.1 测量方法

应按照 GB 10069.3—2006(见 6.2.2)确定声功率级。

6.2.2 试验条件

被试电动机应由变频器供电,且其输出脉冲频率和波形应与实际运行时一致。

电动机宜刚性地安装于能代表实际运行状况的平面上。

在试验过程中,建议在整个速度和负载范围内进行预测量以确定最大噪声发生条件,然后在这些条件下进行最终测量。

如果上述条件无法实现,应按照 GB 10069.3—2006 中规定的试验条件进行。

6.2.3 声功率级限值

当一台电动机按照 6.2.2 的条件进行试验时,其声功率级不应超过表 4 中规定的值。

注:表 4 中的值不同于 GB 10069.3—2006 中的值。但这些值代表了当前技术条件下所能达到的声功率级水平。

如果由于谐振影响而不能满足表 4 中的限值,应考虑在运行模式中包含适当的“越程带”。

表 4 声功率级与输出功率的关系

最大转速时的输出功率/ kW	负载声功率级/dB(A)	
	小于 2 000 r/min	2 000 r/min~3 750 r/min
≤2.2	80	86
5.5	84	90

表 4(续)

最大转速时的输出功率/ kW	负载声功率级/dB(A)	
	小于 2 000 r/min	2 000 r/min~3 750 r/min
11	88	94
22	92	98
37	95	101
55	98	104
110	100	106
220	104	110
550	110	116

6.3 振动烈度的确定及限值

6.3.1 测量方法

应按照 GB 10068—2000 确定振动烈度。

6.3.2 试验条件

被试电动机应由变频器供电,且其输出脉冲频率和波形应与实际运行时一致。

电动机宜刚性地安装于能代表实际运行状况的平面上。

在试验过程中,建议在整个速度和负载范围内(见注 1)进行预测量以确定最大振动发生条件,然后在这些条件下进行最终测量。

注 1: 该建议会显著增加试验时间,GB 10068—2000 中没有要求。

注 2: 对于现场测量,参照 ISO 10816-3。

6.3.3 振动烈度限值

当按照 6.3.2 中规定的试验条件进行试验时,在电动机轴承室测得的振动烈度不应超过 GB 10068—2000 中表 1 所给出的 *N* 级振动烈度。

7 电动机绝缘介电应力

7.1 概述

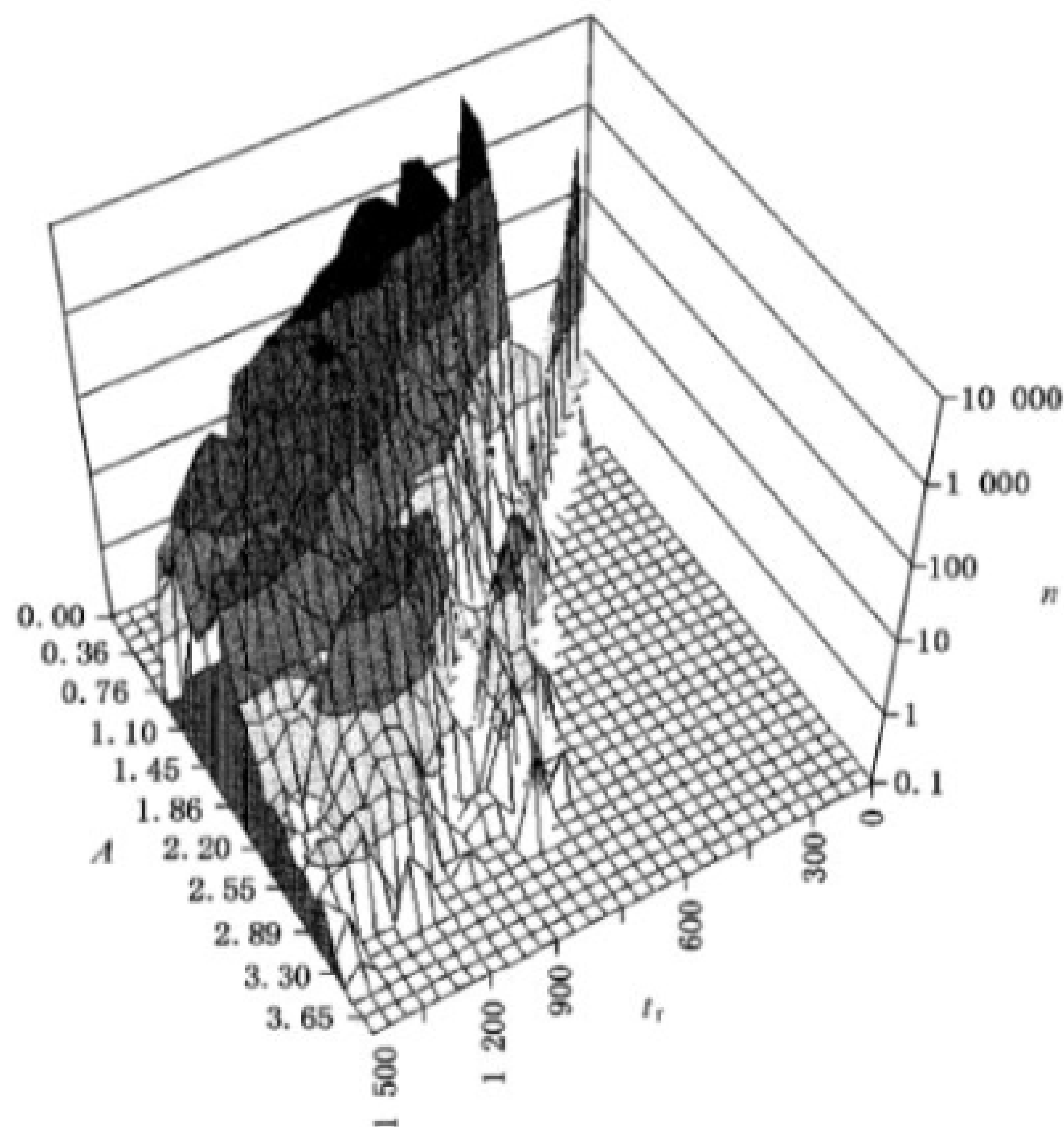
当电动机由变频器供电时,其绝缘结构所承受的介电应力要高于由单纯交流正弦波电源供电时所承受的介电应力。

7.2 原因

电压源变频器产生不同宽度和频率的固定振幅电压矩形脉冲。变频器输出脉冲的电压振幅不会超出直流总线电压(1 倍标么值),取决于整流电源电压或制动电压水平或功率因数修正调整电压。

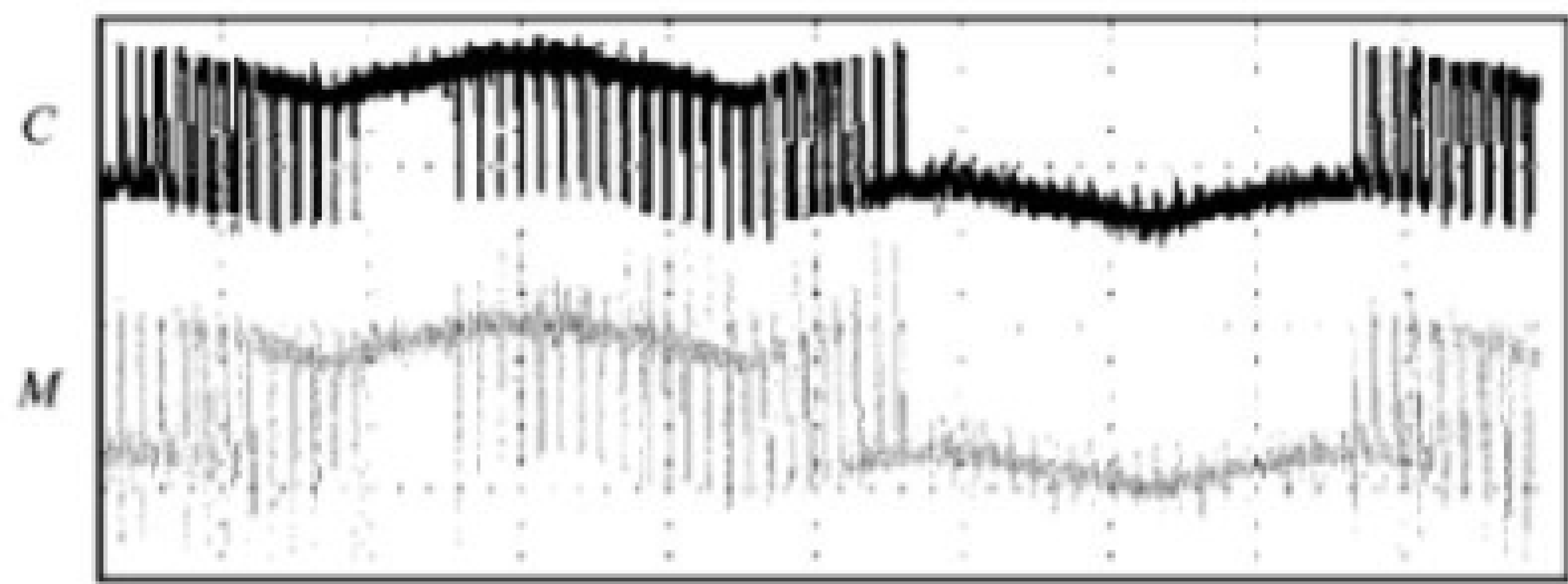
现代变频器输出电压上升时间在 50 ns~400 ns 范围,为了减小输出半导体中的开关损耗应尽可能缩短上升时间。变频器经电缆向电动机供电使电动机端子上产生重复的电压突增,如超过电动机耐重复电压强度势必降低其绝缘寿命。图 11 所示为在变频器供电电动机端子处测得的浪涌信号曲线。从图中可以看出,浪涌信号和浪涌上升时间和幅值之间并不是简单的关系。

电动机端子处电压突增与变频器输出脉冲电压上升时间、接线电缆长度及电动机阻抗有关(相间典型值可达相同电压 2 倍标么值)。这些电压突增是由阻抗不匹配使电缆与电机端子界面的反射波所产生,该现象完全可用输出电压谐波在传输线上的行波理论作解释。由于上升时间缩短,电压波形频率会增高。图 12 所示为在变频器输出端和电动机端子处测得的典型的电压浪涌。图 13 所示为一个浪涌的放大图。



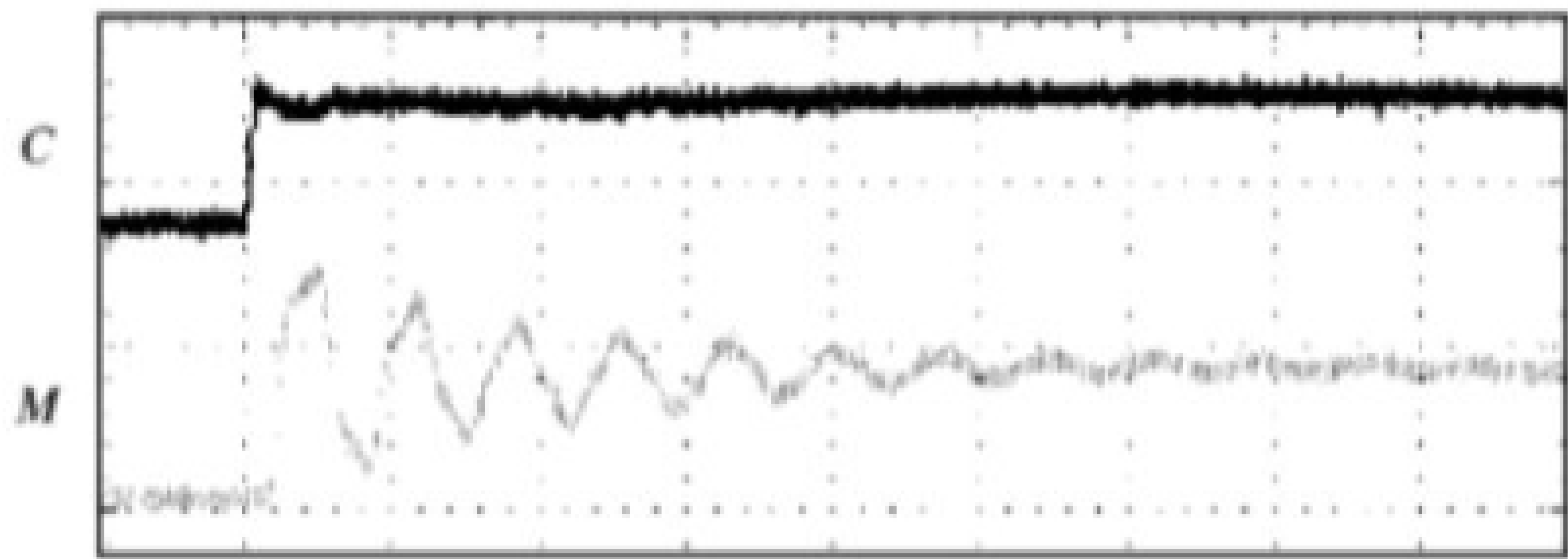
A——浪涌幅值(1 倍标么值)；
 t_r ——浪涌上升时间(ns)；
 n ——浪涌信号曲线(s^{-1})。

图 11 PWM 变频器供电电动机端子处测得的典型的浪涌信号曲线



C——变频器相电压；
M——电动机相电压。

图 12 变频器输出端和电动机端子处测得的典型的相电压浪涌(2 ms/每格)



C——变频器相电压；
M——电动机相电压。

图 13 图 12 中的瞬时浪涌(1 μs /每格)

当电缆长度增加时,脉冲突起通常增加至最大值,然后再下降。同时,电动机端子处的脉冲电压上升时间增长。对于较短上升时间脉冲(在变频器输出端)且电缆长度超过 20 m~50 m(与电缆的类型和其他因素有关),电动机端子处电压上升时间主要取决于电缆的特性而非变频器的上升时间。

当采用分散拓扑(变频器与电动机靠近安装)安装时,由于变频器与电动机之间的电缆较短,电压突

变会减小。

如果变频器与电动机组成一体就不会出现电压突起,此时变频器与电动机之间的电缆长度仅缩至 10 cm。

由于变频器的双重换接以及由于变频器内缺乏设置脉冲之间最小时间间隔的算法,可能会产生大于 2 倍标么值的电压应力:

- 例如,当电动机的一相由负直流电压切换为正直流电压,同时另外一相由正直流电压切换为负直流电压时会发生双重换接。它产生 2 倍电压(标么值)行波到达电动机,经电动机端子反射会出现大于 2 倍的过电压。
- 若变频器中没有最小脉冲时间控制,且两个脉冲之间的时间与连接电缆的时间常数相匹配,在电动机端子处会出现大于 2 倍的过电压。

7.3 绕组介电应力

电动机绕组绝缘的介电应力由电动机端子处的脉冲峰值电压和上升时间(定义见图 14)及变频器产生的脉冲频率确定。

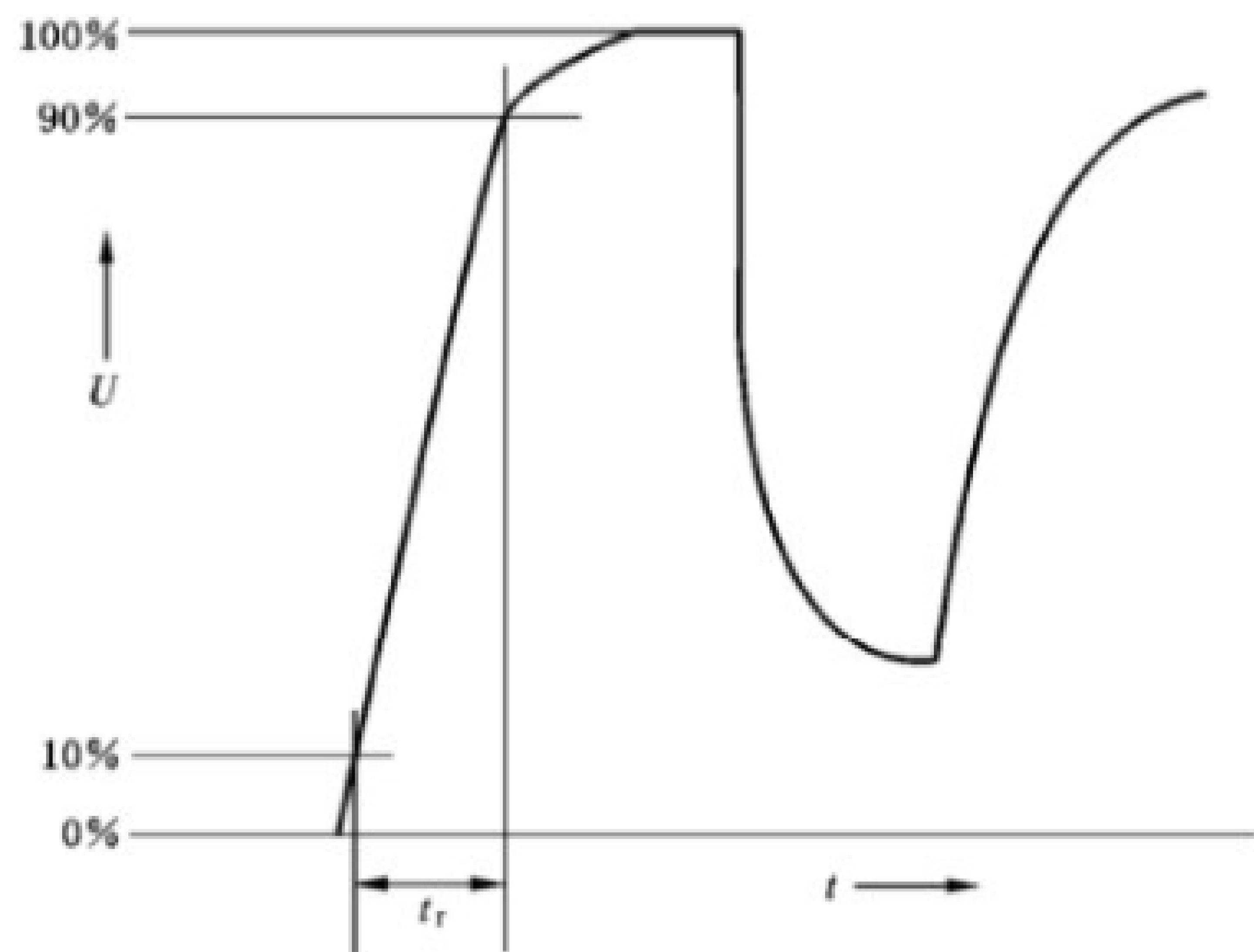
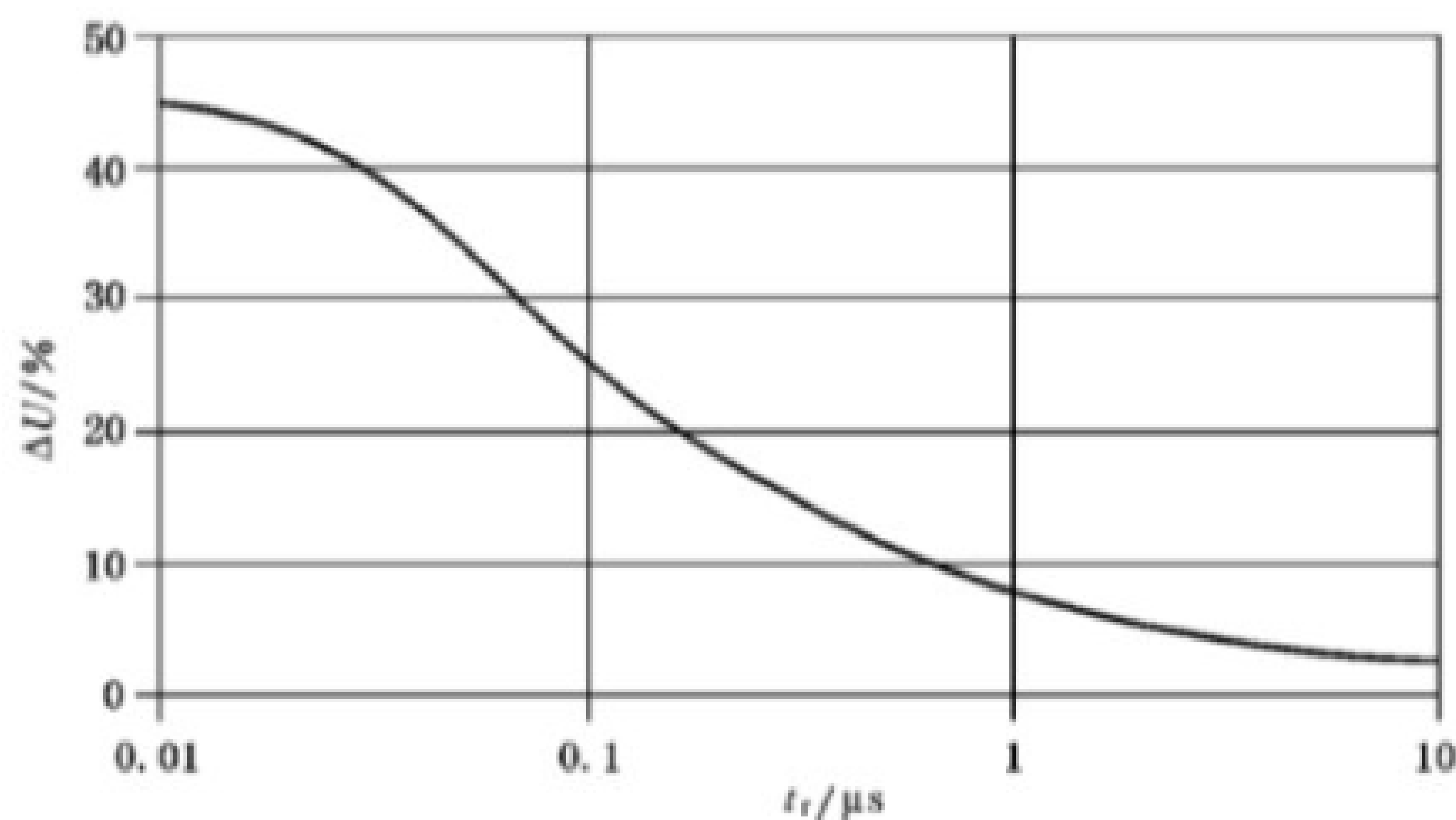


图 14 电动机端子处的脉冲峰值电压和上升时间定义

一部分介电应力由施加到绕组线圈主绝缘(相间或相对地)的电压强度确定;另一部分介电应力受匝间绝缘限制而由脉冲上升时间确定。较短上升时间脉冲导致电压在整个线圈中分布不均衡,在单个相绕组最初几匝的线端出现高强度应力。图 15 所示为一个 50 匝线圈的电压分布与脉冲上升时间的关系。如图所示,上升时间越短,线圈第一匝承受的电压越大。



ΔV ——线圈第一匝承受的电压(与输入电压的百分比);
 t_r ——脉冲上升时间。

图 15 第一匝线圈的电压与脉冲上升时间的函数关系

电动机端子处的短上升时间脉冲也会在每相绕组的最初几匝引起高线间电压,并导致线间过早介质击穿。出现这种现象通常是由于漆包层的介质强度不够。在这种情况下,介质击穿易在低于局部放电起始电压(PDIV)强度时出现。这种类型的绝缘失效无法用 50 Hz 或 60 Hz 的标准介电试验检测出,有待于开发新的验证方法。可以观察到,由于电缆中的高频损耗,在电动机端子处的电压上升时间随电缆长度的增加而增加。

7.4 绝缘应力承受能力

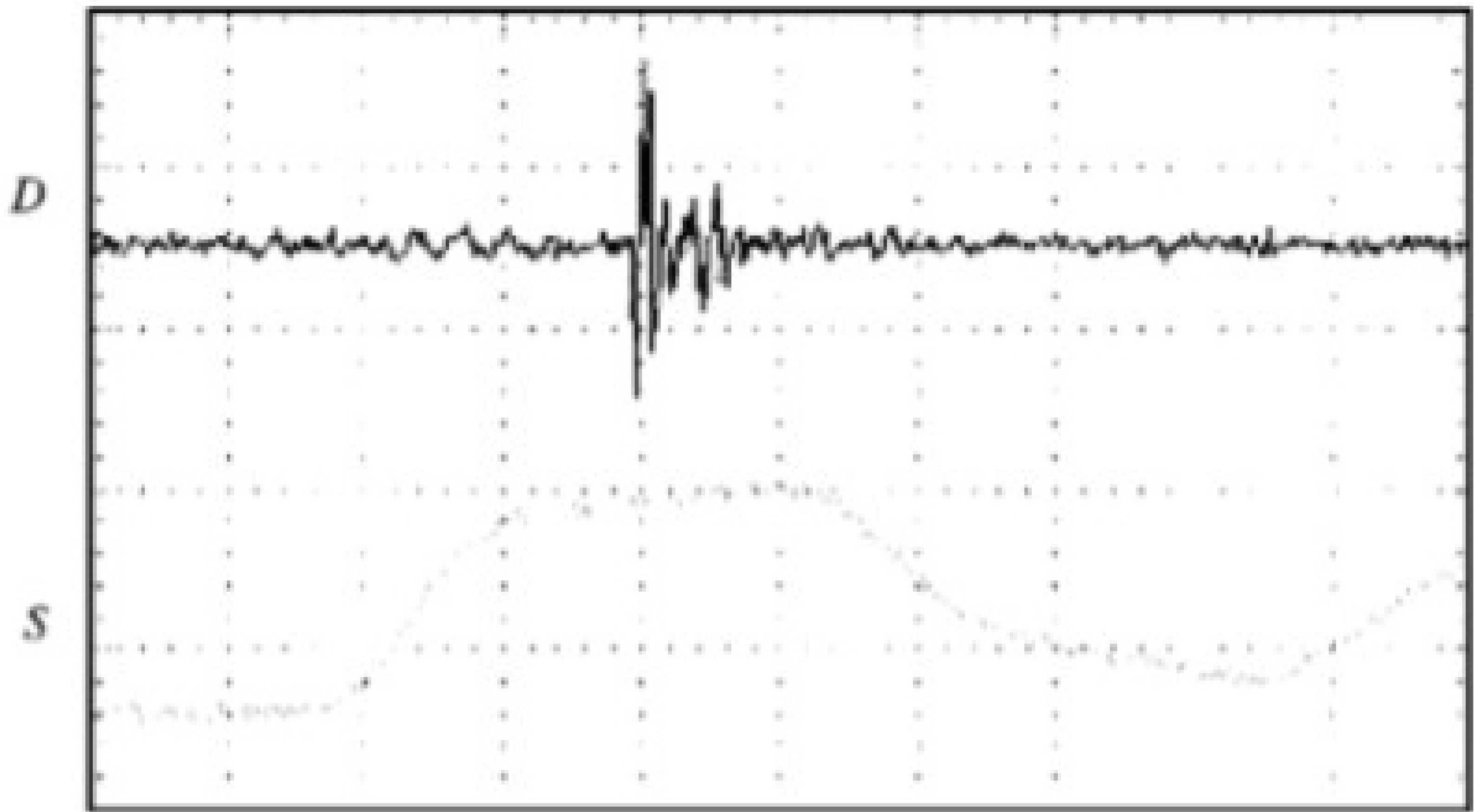
影响过电压应力承受能力的不利因素是 PDIV(局部放电起始电压)或空气中 CIV(电晕起始电压)。局部放电通过化学和机械腐蚀使绝缘结构等级降低。绝缘降级的速率取决于局部放电发生的能量和频率。

影响电动机 PDIV 和 CIV 的因素有:

- 绕组型式:散绕组或成型绕组。
- 设计:相间绝缘材料。
- 浸渍漆种类及浸渍工艺。
- 导线尺寸:大直径导线具有较高的 PDIV。
- 导线绝缘类型。
- 漆膜厚度:导线漆膜增厚可使 PDIV 增加。
- 运行温度:当导线温度上升时,PDIV 下降(通常,绕组温度从 25℃ 升高到 155℃ 时 PDIV 下降约 30%)。

图 16 所示为变频器供电电动机一相浪涌所产生的局部放电脉冲。

注:由于电压应力穿过绝缘间隙而达到其击穿强度,因而在变频器产生的电压浪涌的上升沿发生放电。



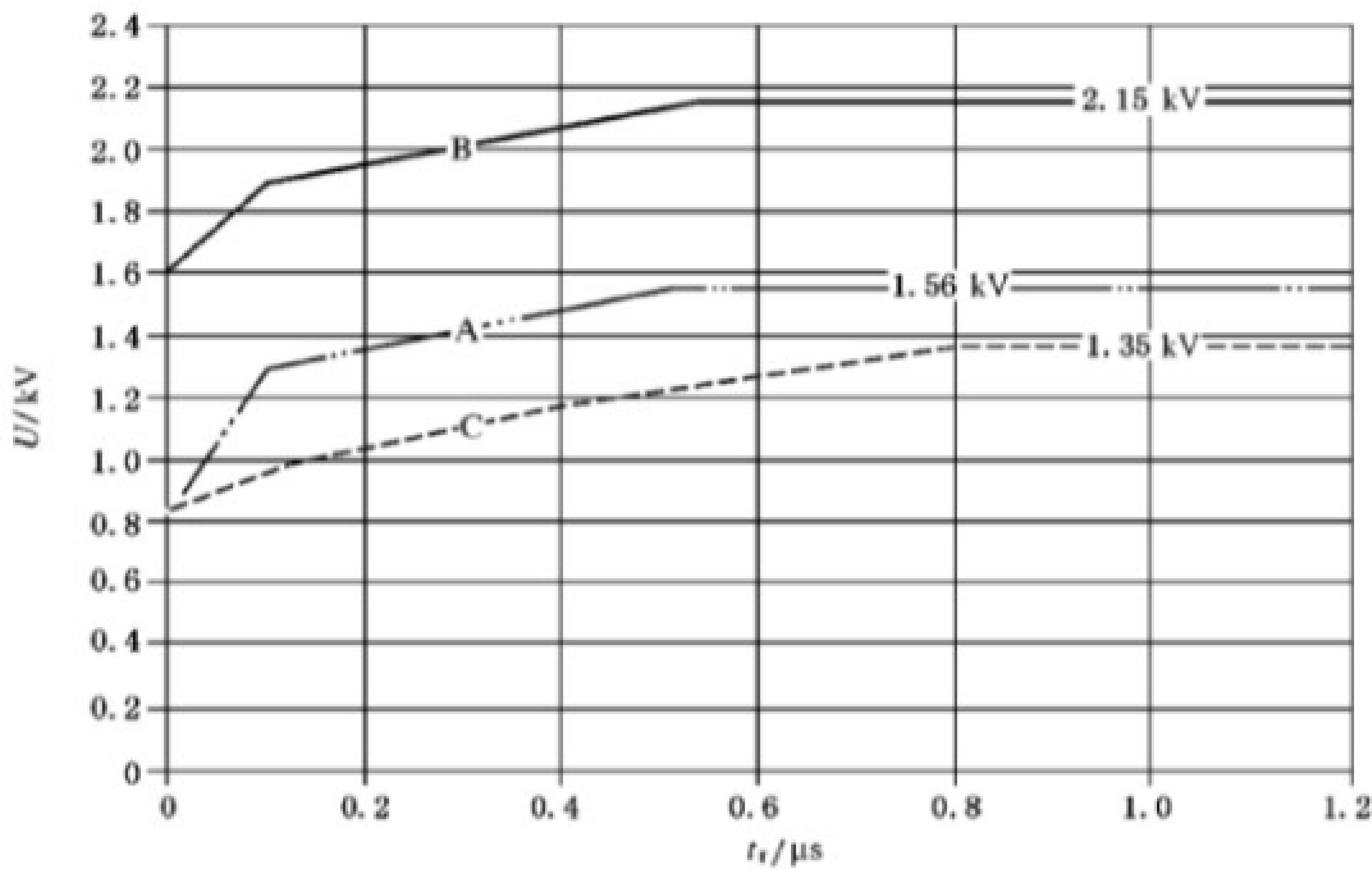
S——电动机端子处的电压脉冲;
D——放电脉冲。

图 16 变频器供电电动机一相浪涌所产生的局部放电脉冲(100 ns/每格)

7.5 职责

系统供应商应保证施加于电动机的电压应力强度不超出其绝缘结构所能承受的电压应力容量(见图 17)。因此,系统供应商有责任在考虑了受变频器拓扑结构和运行模式影响的电压反射、电缆类型和长度、上升时间和重复率等因素后,规定电动机端子处的电压应力强度。与绝缘电应力相关的参数有:瞬态峰值电压值、上升时间、重复率等。

电动机制造商应根据系统供应商的规范检查电动机的电压应力耐受能力。变频器运行产生的实际电压应力应低于电动机绕组绝缘结构的重复电压应力耐受能力,以确保电动机绝缘的使用寿命不至于降低。



B——电压为 600 V 及以下,不带滤波器的交流电动机;
A——电压为 500 V 及以下,不带滤波器的交流电动机;
C——GB/T 20161—2006 中的曲线。

图 17 电动机二相线端间测得的脉冲电压作为脉冲上升时间的函数的限制曲线

7.6 变频器特性

通常,变频器输出电压脉冲幅值即为直流总线电压,其值取决于供电电源电压和输入整流器的类型(无源或有源,是否有电压补偿),且当再生运行时通常会增大(例如,制动时)。

脉冲的上升时间取决于功率半导体器件的开关特性和其驱动及缓冲电路。

注:电动机端子处和变频器输出端的脉冲电压上升时间并没有直接的关系,两者不可混淆。两者之间的关系很复杂,取决于电动机和电缆的高频特性。图 17 涉及的电压上升时间是电动机端子处而非变频器端子处的值。设计 PDS 时,从费用比较考虑,用变频器端子处的预期上升时间(可确定)比用电动机端子处的上升时间(很难预期)安全裕度较大。

7.7 降低电压应力的方法

以下是在给定情况下降低浪涌强度的几种可行方法:

- 尽管困难很大或很难实现,但改变电动机和变频器之间的电缆长度和/或使电缆接地可降低电动机端子处的浪涌电压幅值。
- 将装置改成分散拓扑结构或采用集成的电动机/变频器组合可降低电压突起。
- 改用高介电损耗的电缆(如丁基橡胶或油绝缘纸)。用铁氧体屏蔽的特殊类型电动机电缆比较有效,可减小电压振荡并改进 EMC 质量。
- 安装输出电抗器(见 9.2.2)可与电缆电容一起增加行波的上升时间。

注:在这种情况下,系统设计时须考虑电感中的电压降。

- 在变频器和接入电动机的电缆之间接入输出 dV/dt 滤波器(见 9.2.3)可显著延长浪涌的上升时间。这种情况下可允许使用较长的电缆。
- 接入输出正弦波滤波器(见 9.2.4)可延长上升时间。然而,该滤波器的主要功能是降低 EMC 干扰和附加的电动机损耗以及噪声。而且,对于近似正弦波电压来说,可使用标准的无屏蔽电缆。是否可采用此种方法要取决于所要求的应用特性,尤其是速度范围和动态性能。
- 在电动机端子处安装终端装置(见 9.2.5)可抑制电动机端子处的过电压。
- 防止变频器相间的交叉切换。

- 控制变频器脉冲间的最小时间(取决于电缆类型和长度)。
- 改用可产生较小电压阶跃的变频器,例如,三电平变频器。

7.8 电动机选择

绝缘结构的设计确定了其可容许的脉冲电压应力。通常,低压感应电动机具有三种耐冲击电压水平,如图 17 所示。

- 耐冲击电压水平符合 GB/T 20161—2006:

当采用如 7.7 所述的未采取任何降低电压应力方法的变频器时,电动机仅适用于 400 V 交流供电电压及以下的传动系统,且对电缆长度有一定的限制范围。此外,变频器控制须防止双重切换并具有最小脉冲时间控制。

当采用如 7.7 所述的滤波装置(集成于变频器或安装于系统中)时,电动机适用于 690 V 交流供电电压及以下的传动系统,且对电缆长度没有限制。

- 耐冲击电压水平对应于图 17 中的曲线 A:

当采用如 7.7 所述的未采取任何降低电压应力方法的变频器时,电动机仅适用于 500 V 交流供电电压及以下的传动系统。变频器控制仍须防止双重切换并具有最小脉冲时间控制。

- 耐冲击电压水平对应于图 17 中的曲线 B:

当采用如 7.7 所述的未采取任何降低电压应力方法的变频器时,电动机仅适用于 690 V 交流供电电压及以下的传动系统。变频器控制仍须防止双重切换并具有最小脉冲时间控制。

8 轴承电流

8.1 变频器供电电动机轴承电流的来源

8.1.1 概述

多种情况下可产生轴承电流。在所有情况下,当轴承两端建立的电压超出了润滑剂的绝缘能力时,轴承就会流过电流。该电压可有多种原因产生。

8.1.2 磁路不对称

电动机中的磁路不对称会产生低频轴承电流。这种现象在 400 kW 以上的电动机中更为普遍。非对称磁路在轭部产生一个圆周交流磁通(环形磁通),并在包括电动机的轴、轴承、端盖和机座所组成的导电回路感应出交流电压。如果所感应的电压足以击穿润滑剂绝缘,那么电流就会流过该回路,包括两端轴承。

8.1.3 静电聚集

该电压也可因传动负载(如电离过滤器风扇)在转轴上产生静电聚集而产生。

8.1.4 高频电压

电动机端子处的高频共模电压产生共模电流,其中一部分会流过电动机或传动设备的轴承。该共模电流还可通过变压器效应产生跨越轴承的电压。这些效应的产生是由于使用了快速开关的半导体器件,并且由于不同的影响,会在各种不同容量的电动机中产生轴承问题。这些影响的详细描述见 8.2。

8.2 高频轴承电流的产生

8.2.1 概述

判定哪种机理更突出的最重要的因素是电动机的大小和电动机的机座和轴是如何接地的。电气安装意味着适宜的电缆类型和接地导体的适当接合,电气屏蔽以及额定的变频器输出电压和变频器输出电压的上升速率也起着很重要的作用。轴承电流的来源是跨越轴承的电压。共有三种类型的高频轴承电流:循环电流、转轴接地电流和电容性放电电流。

高频循环电流(I_C)和转轴接地电流(I_S)这两类轴承电流的示意图见图 18。他们受接地布置和接地阻抗的影响较大。

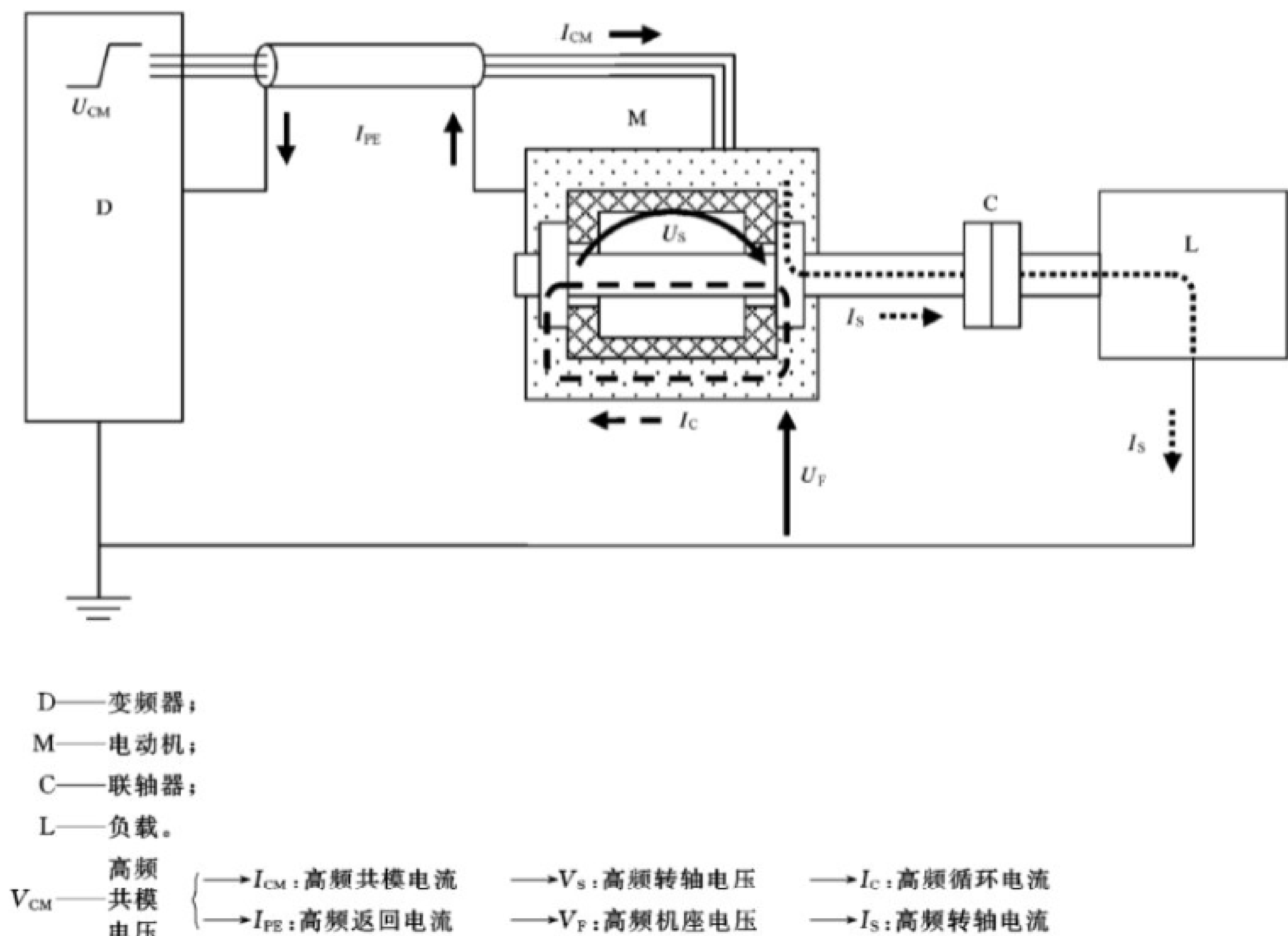


图 18 潜在的轴承电流

8.2.2 循环电流

在大电机中，由围绕定子轭部的高频磁通在 8.1.2 所述的闭合回路中感应出高频电压。该磁通是由从绕组泄漏到定子叠片的电容性电流所产生。感应出的转轴电压会影响轴承。如果该电压足够大，以至于能击穿轴承的润滑膜，那么就有补偿电流流过定子以平衡磁通，经转轴、轴承和定子机座形成闭环。

这些高频电流可叠加于 8.1.2 所述的低频电流之上。

8.2.3 转轴接地电流

泄漏到定子机座的电流须回流到它的源头变频器中。任何回流路线都包含阻抗，因此与地电平相比机座电位更高。如果电动机转轴经传动机械接地，那么电动机轴承将承受机座增加的电压。如果该电压的增加超出了润滑膜的绝缘能力，那么就会有部分电流流经轴承、转轴和传动机械再返回至变频器。

8.2.4 电容性放电电流

共模电压在电动机内部电容上的电压分布会引起足够大的轴承电压并产生高频轴承电流脉冲（称作静电放电加工电流）。如果转轴没有经传动机械接地而是电动机机座接地保护时，就会发生这种现象。

8.3 共模电路

8.3.1 概述

共模电路是在包括电动机及其轴承、负载和变频器在内的整个系统中，供循环电流流过的一个封闭的回路。

在正常情况下,典型的三相正弦波电源是平衡且对称的,中性点电压为零。然而,当采用 PWM 切换的三相电源供电时,由于是把直流电压转换至三相电压,因此情况就不同了。虽然输出电压的基频分量是对称和平衡的,但无法在仅有两个输出电平的情况下使瞬时三相输出电压之和为零。这就导致中性点电压不为零,该电压就是共模电压的来源。在任何负载情况下,该电压可在 Y 形连接的电动机绕组的中性节点测得(或在非 Y 形连接的电动机绕组的模拟中性节点测得)。该电压与直流总线电压成比例,其有效频率与变频器开关频率相同。

任何时候,变频器三相输出电压中的一相从一个电位变化到另一电位,使与该电压变化成比例的电流经由输出回路所有元件的对地电容流入大地,再经由变频器的对地电容和接地导体流回变频器。

8.3.2 系统共模电流流程

从电动机机座回流至变频器外壳的泄漏电流的回流路径包括电动机机座、电缆屏蔽或接地导体和工厂建筑结构中的可能导电部件,这些部件都具有电感,当共模电流流过时会产生电压降,使电动机机座电位高于变频器外壳的电位。电动机机座电压是变频器共模电压的一部分。共模电流会寻求具有最小阻抗的路径流过。如果预期的路径表现出较大的阻抗,如电动机机座接地,则电动机机座电压会使一部分共模电流转向至一条非预期的路径,如穿过建筑。在实际装置中,存在许多并联的路径,大多对共模电流或轴承电流值的影响较小,但当有 EMC 要求时就显得比较突出了。

然而,如果路径呈现的阻抗足够大,在电动机机座和变频器外壳之间可能出现大于 100 V 的电压降。在这种情况下,电动机的转轴通过金属联轴器联接至齿轮箱或其他牢固接地且与变频器外壳具有相近电位的传动机械,那么就可能有部分变频器共模电流流经电动机轴承、转轴和传动机械返回至变频器。

如果机器的转轴与地电平没有直接的接触,则电流将经由齿轮箱或负载机器轴承流通。这些轴承将先于电动机轴承而损坏。

8.4 杂散电容

8.4.1 概述

电动机中的杂散电容很小(见图 19),对低频呈现出高阻抗而阻塞了低频电流。然而,现代变频器产生的快速上升脉冲具有很高的频率,即使电动机中很小的电容也会提供低阻抗路径供电流流通。

8.4.2 主要电容

电动机电容主要出现在定子绕组和电动机机座之间,沿定子圆周和长度方向分布。由于电流沿线圈泄漏到定子中,因此进入定子线圈的高频分量电流大于流出线圈的电流。

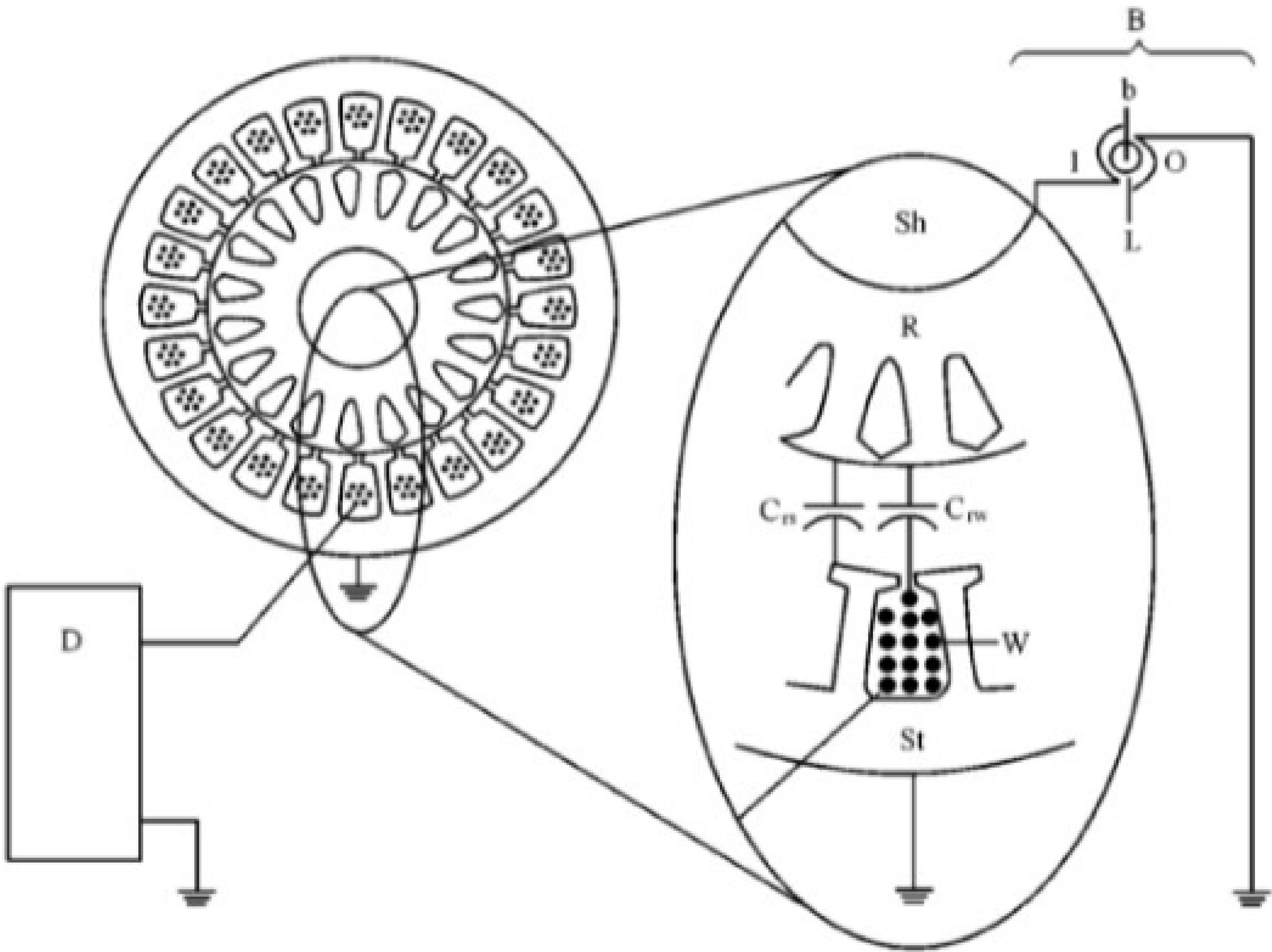
净轴向电流在定子叠片中流通产生的高频环形磁通,并在回路中产生 8.1.2 所述的轴向电压。如果转轴电压足够大,就会有高频循环电流流过转轴和两端轴承,且在某些情况下,会流过负载机械的转轴和轴承。该循环电流通常会造成轴承损坏,其峰值一般为 3 A~20 A,取决于电动机的大小、电动机端子处的电压上升速率和直流环节电压水平。

8.4.3 其他电容

定子绕组和定子叠片之间的电容是共模电路的重要参数。此外,还有其他电容,如定子绕组端部和转子之间的电容或在电动机定子铁心和转子表面之间的间隙中的电容,且轴承本身也具有电容。

变频器输出的快速变化的共模电压不仅在电动机圆周和长度方向电容中产生电流,而且还在定子绕组和转子之间电容中产生电流并流入轴承。

流入轴承的电流可根据轴承的情况快速变化。例如,只有当轴承的滚动体被润滑剂包围且不导电时,轴承电容才存在。如果轴承电压超出了轴承润滑膜的击穿极限值或轴承润滑膜已减少而使之与轴承座圈接触,则轴承电容发生短路。在很低的转速下,轴承也会由于缺乏绝缘润滑膜而有金属接触。



- D——变频器；
W——绕组；
b——球式滚子；
Sh——转轴；
 C_{rs} ——转子-定子电容；
l——内圈；
R——转子；
 C_{rw} ——转子-绕组电容；
O——外圈；
St——定子；
B——轴承；
L——润滑模。

图 19 电动机电容

8.5 过量轴承电流的后果

图 20 和图 21 所示为由于共模电流和放电所引起的典型的轴承损坏。



图 20 放电引起的轴承凹点(凹点直径为 $30\text{ }\mu\text{m}\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)

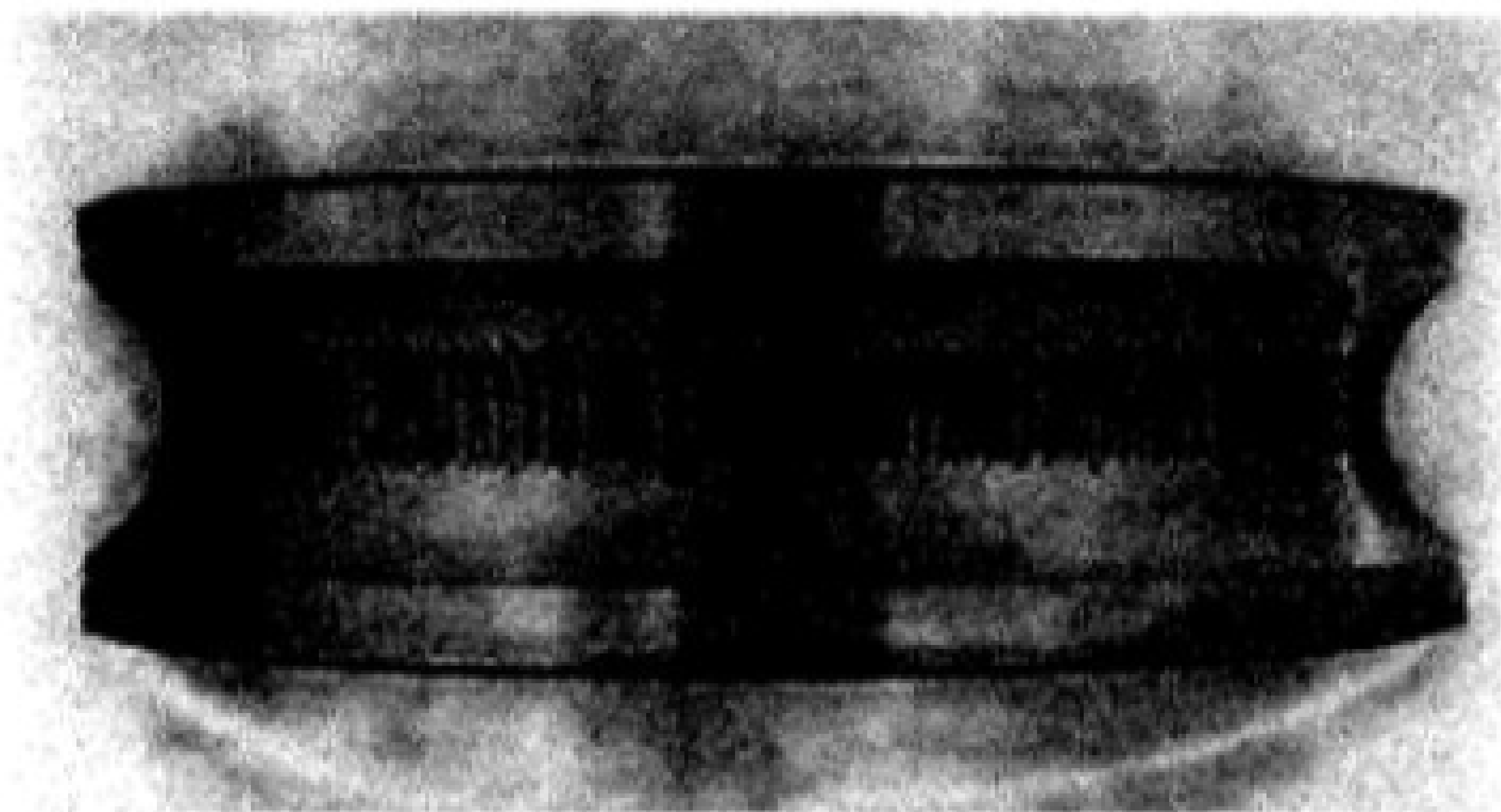


图 21 过大轴承电流引起的凹槽

8.6 防止高频轴承电流损害

8.6.1 基本方法

以下三种基本方法可防止高频轴承电流,可单独采用或合并采用:

- 适宜的布线和接地系统;
- 改变轴承电流回路;
- 削弱高频共模电压。

以上这些措施是为了减少跨越轴承润滑膜的电压值使其不至于引起高频轴承电流脉冲,或将脉冲值削弱而使其不至于影响轴承寿命。对于不同类型的高频轴承电流,须采用不同的方法。

解决高频电流的基础是采用适宜的接地系统。标准的设备接地设计主要是为了在系统频率发生故障时,为保护人员和设备而提供足够低的阻抗连接。如果按照第 9 章的要求进行安装,则在高共模电流频率下变速传动可有效接地。

8.6.2 其他预防措施

- 使用绝缘轴承。

注:在实际应用中,使用一些具有不同厚度类型的轴承绝缘并置于不同的位置(例如,在转轴和内轴承座圈之间、外轴承座圈和尾轴承架之间、尾轴承架和机座之间)。常用外表面具有陶瓷涂层的抗摩擦轴承(所谓的涂层轴承),也可用带陶瓷滚动元件的轴承。

- 用滤波器降低共模电压和/或 dV/dt 。
- 对于可能被轴承电流损坏的负载或其他设备采用非导电联轴器。
- 在转轴和电动机机座之间用电刷接触。
- 尽可能使用低电压电动机和变频器。
- 变频器以满足噪声和温度要求的最低开关频率运行。
- 避免使用双重转换(并联开关)。

表 5 对其中一些方法的效果进行了对比。

表 5 预防轴承电流的各种措施的效果

对策	电流类型			附加说明
	环路电流	轴对地电流	电容性放电电流	
1. 非传动端轴承绝缘或陶瓷层滚子	有效	无效 仅保护一个轴承	无效 仅保护一个轴承	非传动端已绝缘,不需要绝缘的联轴器
2. 两端轴承均绝缘或陶瓷层滚子	有效:对此类电流一个轴承绝缘已够	有效	有效:可能还需要用电刷连接	小机座号大多有效。大机座号很少用
3. 两端轴承均绝缘或陶瓷滚子,再用绝缘联轴器和转轴通过电刷接地	有效	有效	有效	大多有效(特别是对大电机)。避免损坏负载机械。需要维修

表 5(续)

对策	电流类型			附加说明
	环路电流	轴对地电流	电容性放电电流	
4. 非传动端轴承绝缘, 传动端用电刷接地	有效: 对此类电流不需要电刷, 非传动端装转速计需保护	有效: 不保护负载机械轴承	有效: 电刷接触阻抗要小	需要维修。大机座号常用。传动端用电刷可不用绝缘的联轴器
5. 用一电刷接地, 轴承不绝缘	无效: 仅保护一个轴承	有效: 不保护负载机械轴承	有效: 电刷接触阻抗要小	需要维修
6. 两端用二电刷接地, 轴承不绝缘	有效: 电刷接触阻抗要小	有效: 不保护负载机械轴承	有效: 电刷接触阻抗要小	需要维修
7. 低电阻润滑油和/或石墨填充的轴承密封	稍有效	稍有效	有效: 取决材料状况	无长期运行经验, 降低润滑效果
8. 用法拉第笼转子	无效	无效	非常有效	大电机常出现变频器环路电流问题
9. 共模电压滤波器	有效: 降低高频电压也可降低低频电流	有效	有效	滤波器安装在变频器输出侧, 可大大降低共模电压
10. 联轴器绝缘	无效	非常有效	无效	也可防止损坏负载机械
11. 机座与负载机械联接	无效	有效	无效	也可防止损坏负载机械

9 安装

9.1 接地、搭接接地和布线

9.1.1 概述

9.1 所给出的建议仅是对于保护接地连接的导体和电动机电缆的适用性、可靠性及 EMC 安装等问题给予一般指导。对于特殊安装, 应遵循与接地有关的地方法规和适合于系统集成器, 并且应遵守变频器供应商涉及 EMC 的指示。详见 GB/T 12668.3—2002 和 IEC 61000-5-1。通用 EMC 安装技术的综合指南见 IEC 61000-5-1 和 IEC 61000-5-2。

9.1.2 接地

9.1.2.1 接地目的

接地的目的是为了安全、可靠和无干扰地运行。传统接地是基于电气安全, 有利于保障人身安全和限制因电气故障而造成的设备损坏。PDS 的无干扰运行须采取更有力的措施以保证在高频时的有效接地, 这就要求地面、设备外壳、线路板与大地等电位。

另外, 正确的接地可强有力地削弱电动机转轴和机座的电压, 减小高频轴承电流并防止轴承过早失效和损坏辅助设备(见第 8 章)。

9.1.2.2 接地电缆

为了安全起见, 接地电缆应遵照地方法规并根据不同情况确定尺寸。选择适宜的电缆特性和布线规则也有助于降低作用于 PDS 不同元件上的电应力水平, 从而提高其可靠性。此外, 所选用的电缆类型须符合 EMC 要求。

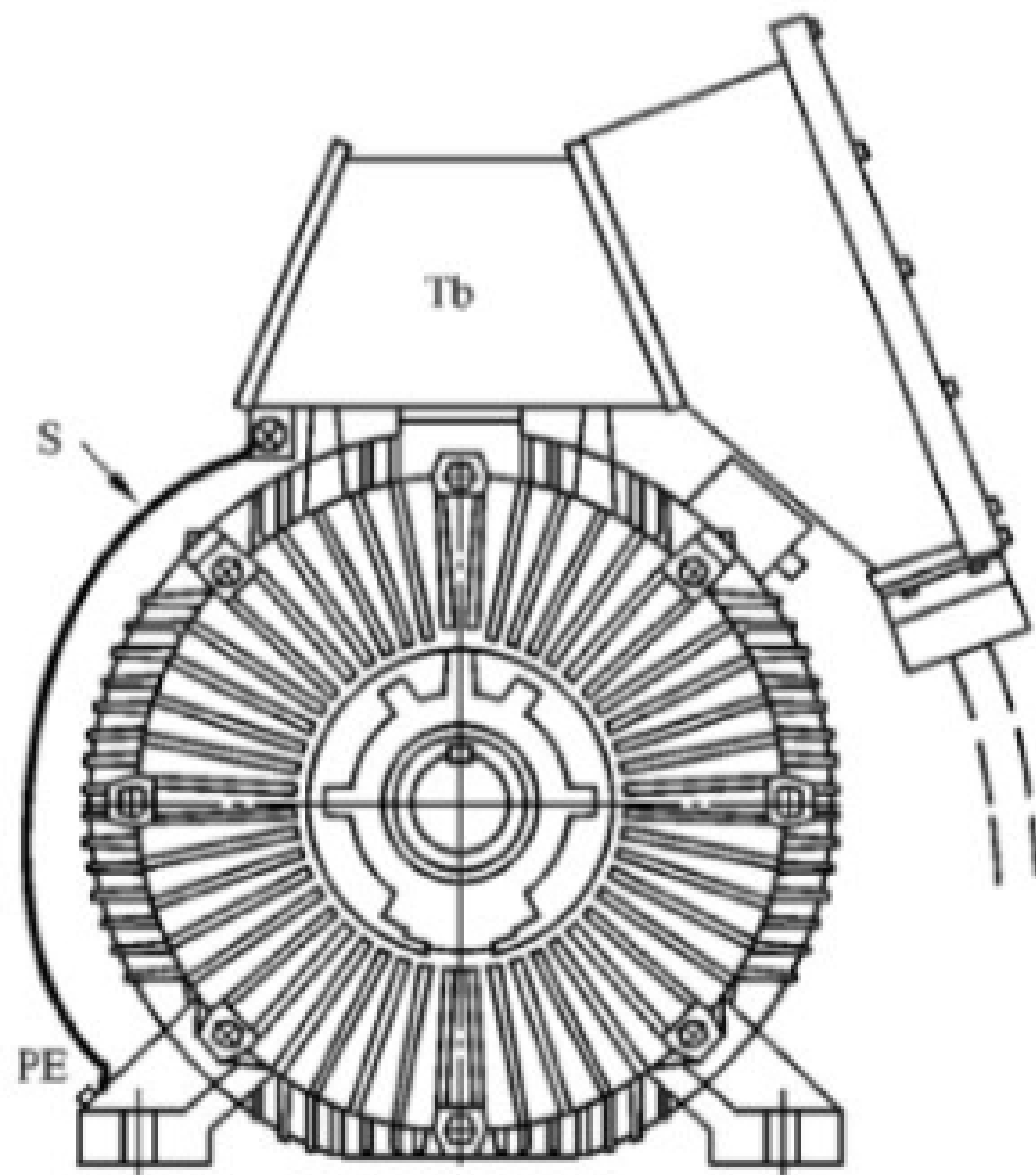
9.1.3 电动机搭接接地

搭接接地在某种程度上不仅是为了满足安全要求, 还可以提高装置的 EMC 性能。可用金属条、网

带或圆电缆等导体接地,对高频系统以金属条或编织带为好,带的长/宽比应小于 5。

对于 100 kW 以上电动机,驱动机械的外部接地条件要求电动机机座与驱动机械之间搭接。典型的应用有水泵(用水接地)和集中润滑的齿轮箱(用油管接地)。这种联接是为了实现等电位和提高接地效果,其应具有低电感,因此应采用金属条或编织带,并且应沿着最短的路径。在有些情况下,可能要求有另外的电动机部件间进行搭接(见图 22),例如在电动机机座和接线盒之间。

当电动机和驱动负载使用共同的润滑系统时,须小心防止联轴器跨越绝缘轴承室。



Tb——接线盒;
PE——连接至电动机机座;
S——搭接接地条。

图 22 电动机接线盒与机座搭接

9.1.4 电动机电力电缆

9.1.4.1 推荐配置

大于 30 kW 电动机接线宜用单芯动力线和多根接地线对称配置的电缆。

较小功率且易于布线的场合优先采用多芯屏蔽电缆。30 kW 及以下电动机和 10 mm² 及以下电缆也可为不对称配置电缆,但布线要特别小心,该功率范围常用金属箔屏蔽线。

如以屏蔽层作为防护导线,屏蔽层电导至少应达到相导体电导的 50%,高频情况下至少要达到 10%。对于用铜或铝屏蔽/铠装层来说,这些要求很容易达到。如以钢材料作为屏蔽层,因其电导率较低,就需要更大的横截面积且屏蔽螺旋应具有较小的梯度。屏蔽层电镀将增大其高频电导。如屏蔽层阻抗过大,高频返回电流引起的电压降将明显提高机座相对于接地转子的电位,而引起非预期的轴承电流流过(见第 8 章)。对屏蔽层的表面传输阻抗进行估计可以评定其 EMC 效果。即使在高频状态下该阻抗也应相当低。

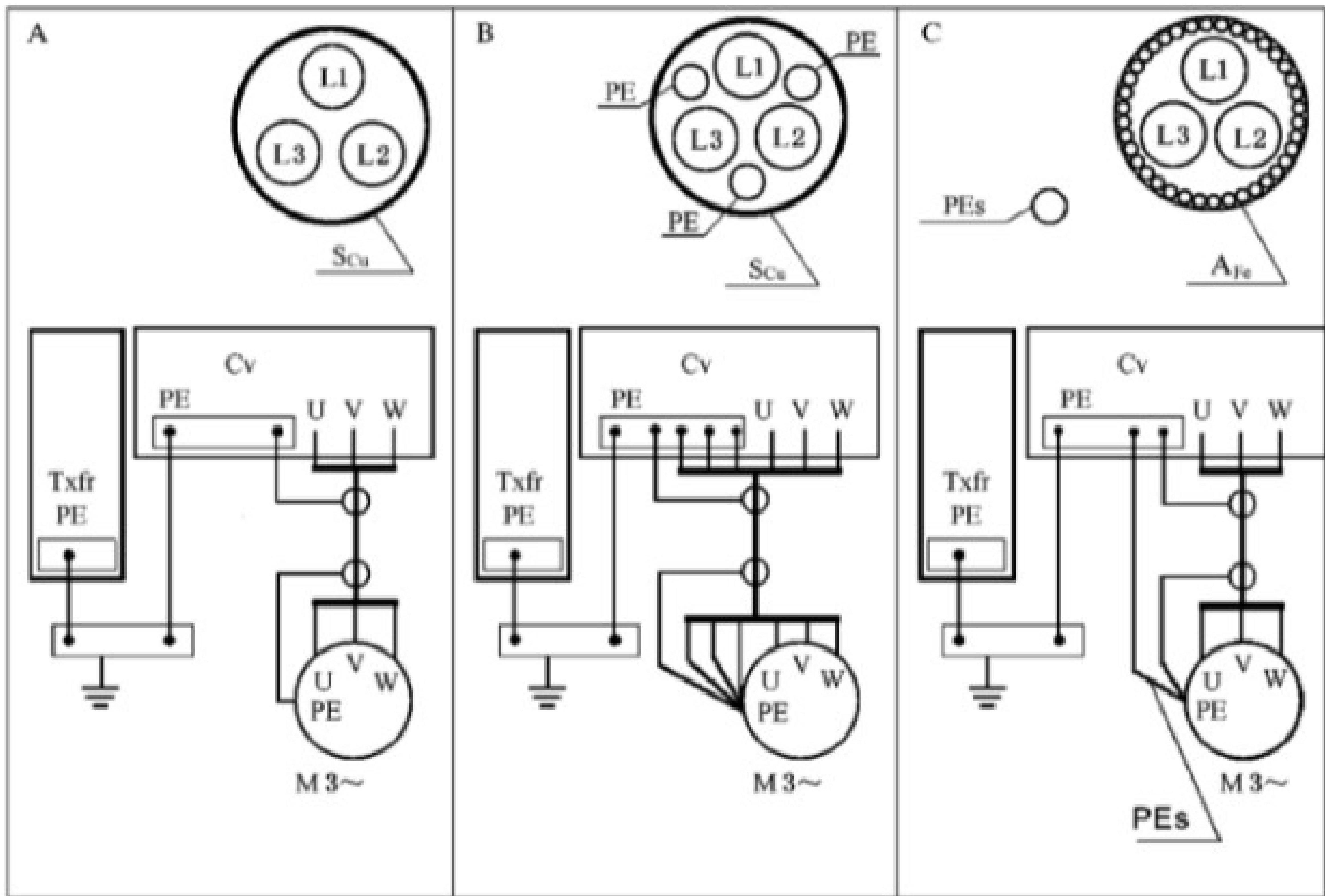
电缆屏蔽应两端接地。沿圆周 360°搭接接地能有效屏蔽整个高频段,对 EMC 性能有利(见 9.1.4.3)。

合适的屏蔽电缆实例有:

- 带一同心的铜或铝防护层的三芯电缆(见图 23A)。在这种情况下,各相线彼此等距且与屏蔽层等距,屏蔽层也作为防护导体。
- 带三根对称接地导体和一同心屏蔽/铠装三芯电缆(见图 23B)。该类电缆的屏蔽层仅用于 EMC 和人身保护。

注:对于小功率系统,宜使用单个导体作为保护接地。

- 用钢和镀锌铁绞线(小节距)作屏蔽/铠装的三芯电缆(见图 23C)。如果屏蔽层的横截面不够大,需另加一独立的接地导体。



SCu——同心铜(或铝)屏蔽;
AFe——钢带铠装;
Txfr——变压器;
Cv——变频器;
PEs——独立的接地线。

图 23 电动机电缆屏蔽层连接实例

为了与变频器和电动机接线盒相联接,电缆两端应去除屏蔽层,该部分的长度应尽量短。

一般情况下,100 m 及以下长度的屏蔽电缆可不采取附加措施而直接使用。对于较长的电缆,可能要采取一些特殊的措施,如输出接滤波器。当使用滤波器时,从变频器输出至滤波器之间的电缆应符合以上要求。如果使用的滤波器 EMC 性能较好,则从滤波器至电动机之间的电缆不需屏蔽或对称,但可能要求电动机另外接地。

无屏蔽的单芯电缆也可用于大容量电动机,但须紧密安装在金属电缆桥上,电缆桥至少在电缆敷设路径的两端与接地系统搭接。需注意源自这些电缆的磁场可能会在附近的金属件中引发电流,从而产生发热并增加损耗。

9.1.4.2 并联对称布线

当连接大功率变频器和电动机时因电流很大需要用多根电缆并联,这时应按照图 24 采用易于(对称)安装的适宜布线。

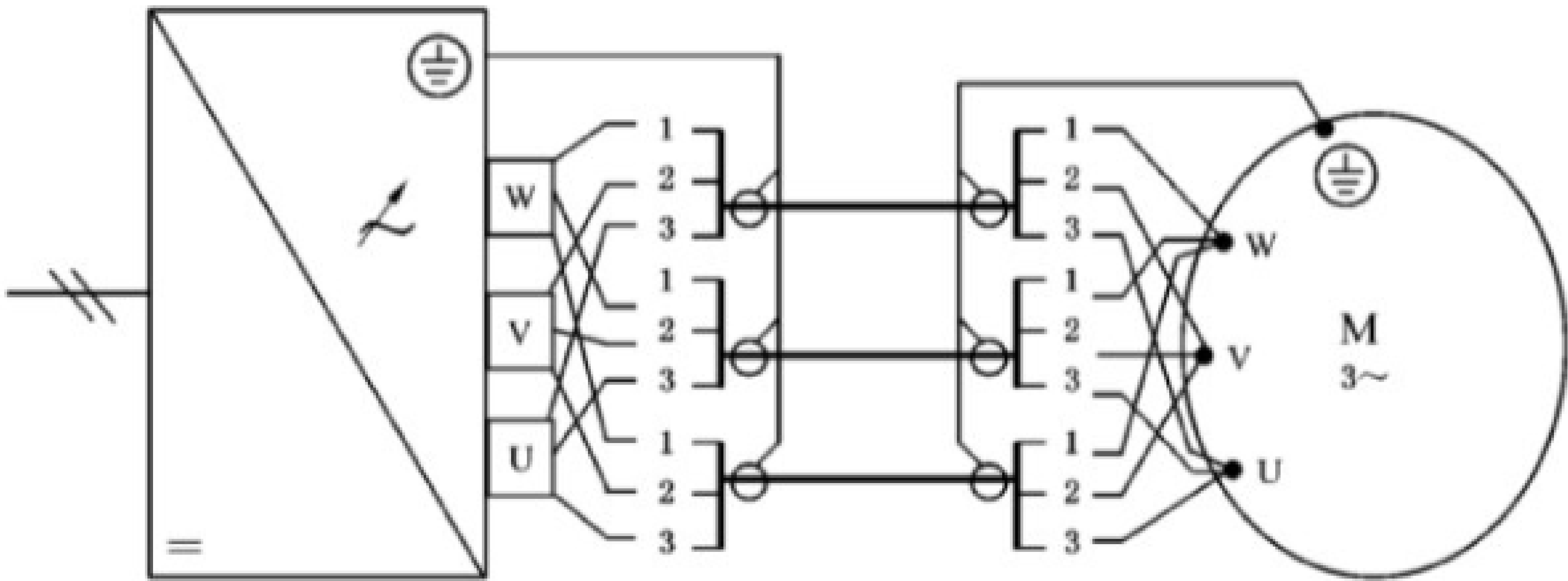


图 24 大功率变频器和电动机多根电缆并联连接

9.1.4.3 电缆的线端

要确保电缆屏蔽层与变频器 and 电动机外壳高频电连接,就要求电动机接线盒采用如铝、铁等导电金属制造。屏蔽层应沿电缆周围 360°连接,这样从直流到 70 MHz 频率范围内均有较低的阻抗,能有效降低转轴和机座电压和改善 EMC 性能。

图 25 和图 26 所示分别为小功率电动机和变频器的较好的应用实例。

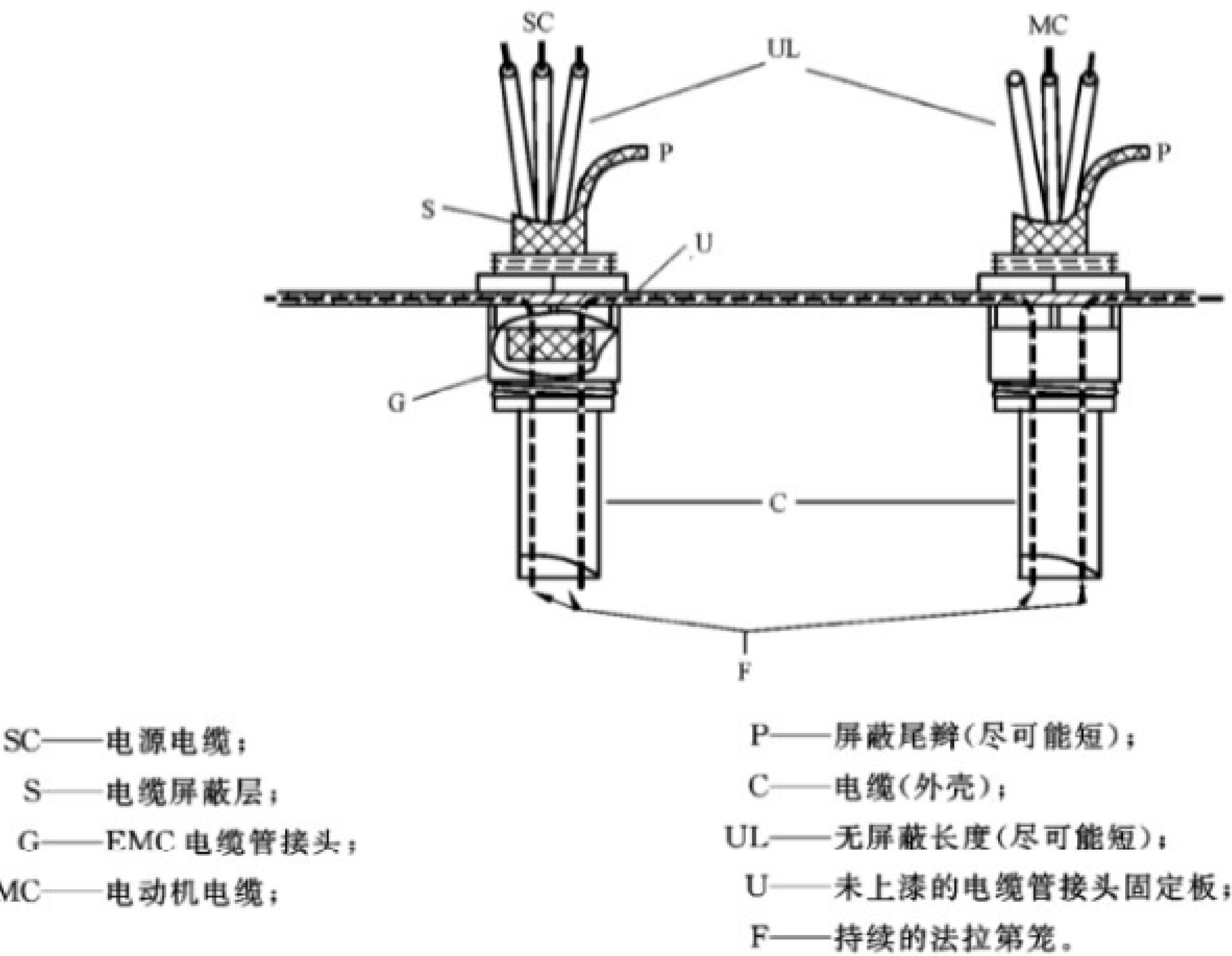


图 25 变频器与高频电缆夹 360°连接,见法拉第笼

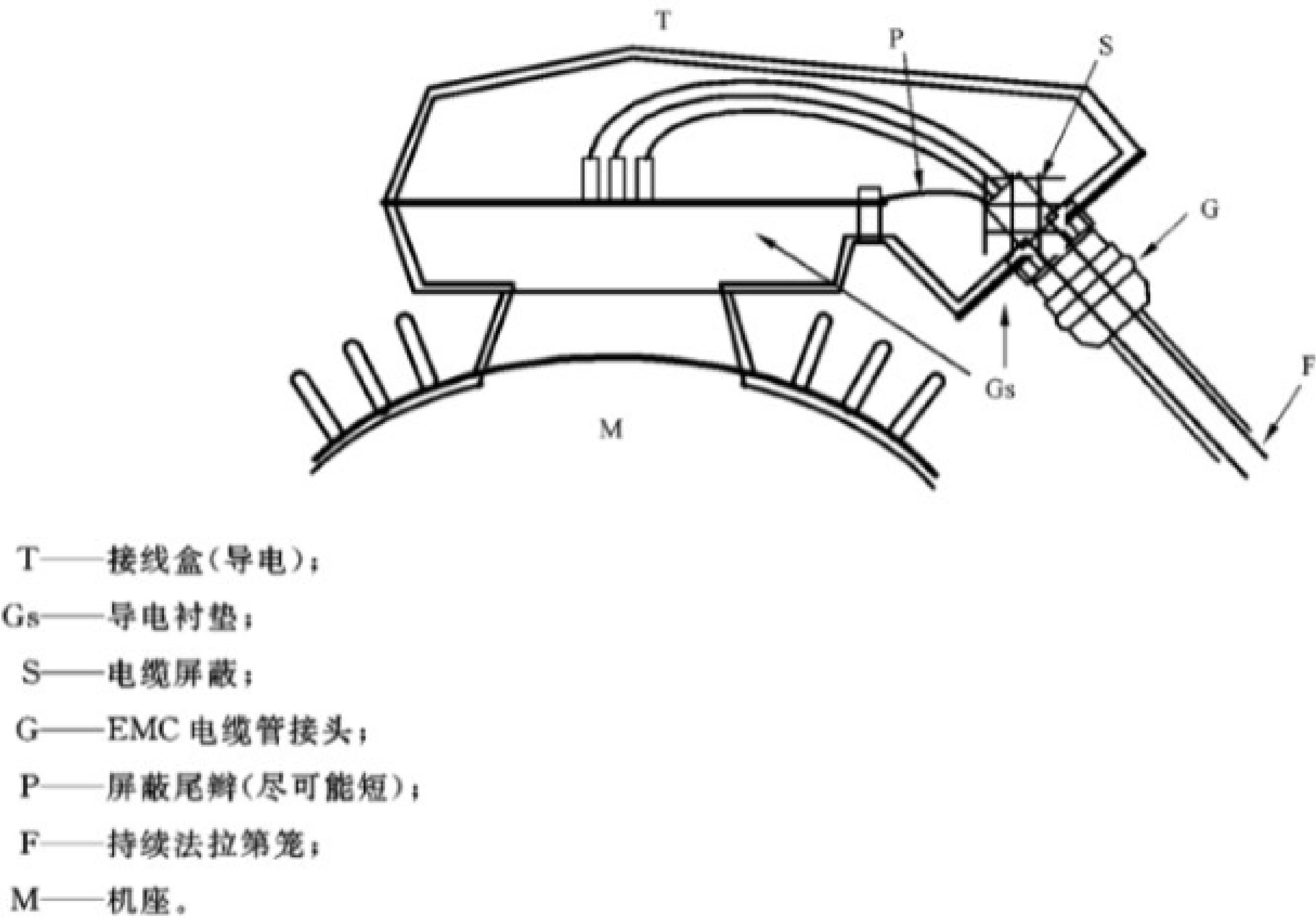


图 26 电动机终端 360°连接

电动机接线盒处的屏蔽层连接应采用如图 27 a)所示的 EMC 电缆接头或图 27 b)所示的屏蔽接线夹。变频器外壳处也要按照此要求连接。

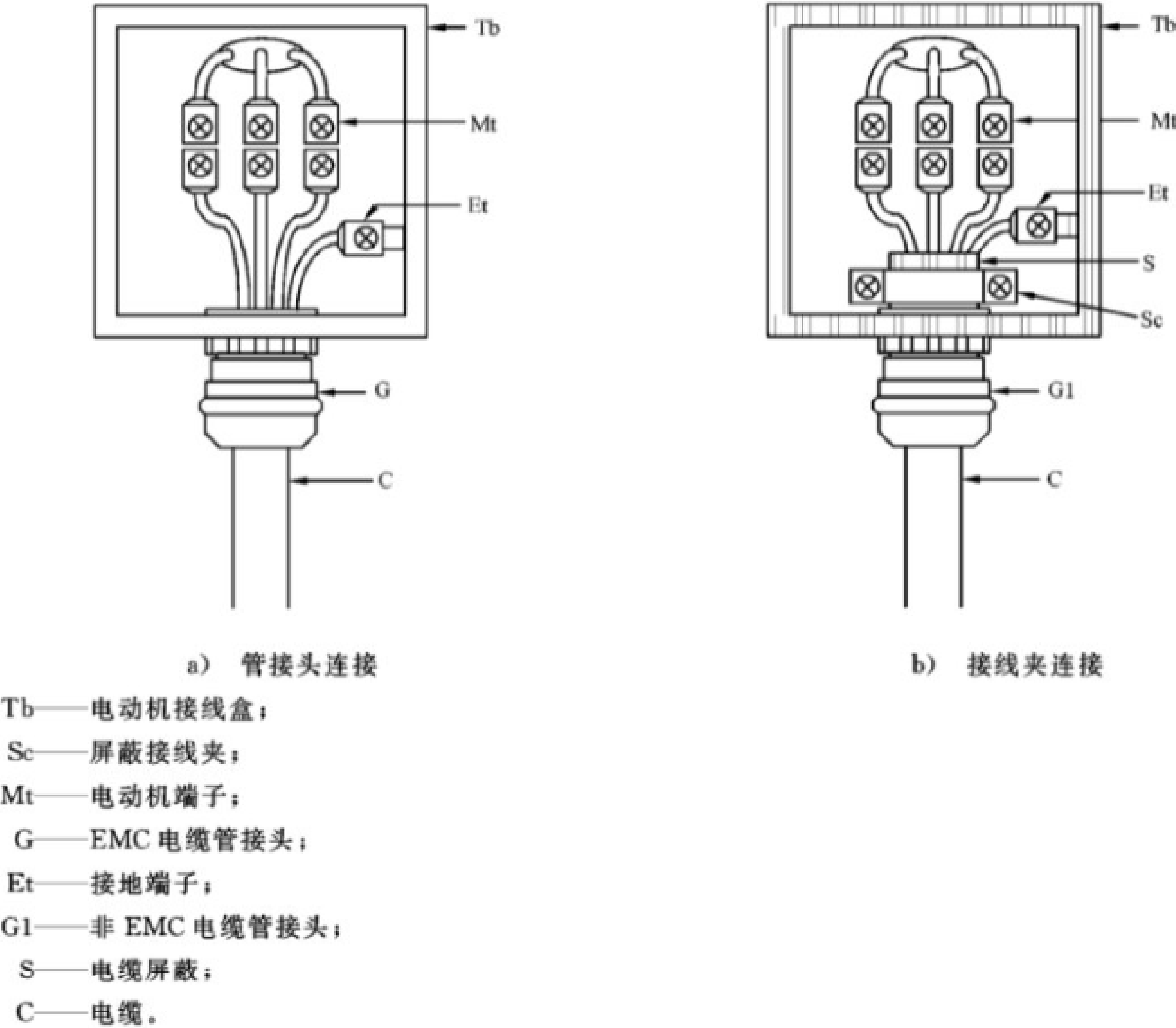


图 27 电缆屏蔽层连接

9.1.4.4 辅助设备的布线和接地

为防止在系统内形成电流通路而引发错误读数或损坏,一些辅助设备(如转速计等)在电气上应与电动机绝缘。对于联接器型的编码器,可采用绝缘的联轴器。对于空心轴型转速计可通过球关节或安装臂绝缘。转速计电缆屏蔽层应与其外壳绝缘。屏蔽层的另一端在变频器处接地。

空心轴转速计的空心轴与外壳之间有电气绝缘时,允许电缆屏蔽层与转速计外壳连接。

脉冲编码器最好采用双屏蔽电缆接线。为了减小高频干扰,屏蔽层应通过电容在编码器端接地。单屏蔽电缆可用于模拟转速计。

为了防止不需要的耦合,辅助设备的电缆线路应与动力布线分开。

9.1.4.5 集成传感器的布线

通常,9.1.4.4 所给出的对模拟转速计的建议适用于与电机集成的传感器(例如,热电偶)。然而,由于其接线通常在电动机内与动力线非常接近,因此其绝缘需有足够强度以耐高压。在这种情况下,不可能总是使用屏蔽电缆。

9.2 电抗器和滤波器

9.2.1 概述

在一些装置中,为了降低设备承受的电应力或改善 EMC 性能,可采用电抗器或输出滤波器。

9.2.2 输出电抗器

这类特殊设计的电抗器用以调节 PWM 输出波形,也可用来降低 dv/dt 和峰值电压。然而需要谨慎的是,从理论上说,如果电抗器选择不当就会延长上升持续时间,特别是铁氧体磁心的电抗器。在图 28 a)的示例中,电抗器的增加使峰值电压上升时间延长了 $5\ \mu s$ 左右且使其幅值降至 792 V。正常情况下,输出电抗器装在变频器箱体内部。输出电抗器也可用于接线长达几百米的大型传动设备以补偿电缆

充电电流。

9.2.3 限压滤波器(dv/dt 滤波器)

限压滤波器是由电容、电感和二极管或电阻组成,用以限制 dv/dt 值,降低电压幅值和增加峰值电压上升时间。在图 28 b)的示例中,峰值电压降低至 684 V,dv/dt 为 40 V/μs。由此会增加的 0.5%~1.0%的损耗,还可能降低电动机的最初起动转矩和最大转矩,系统应对此进行调节。

9.2.4 正弦滤波器

正弦滤波器是使高频电流分流的低通滤波器,使输出到电动机的电压波形接近正弦形。图 28 c)所示为 1.5 倍开关频率周期的相间输出电压(微分)。通常有以下两种类型的正弦滤波器:

- 1) 相对地和相间滤波;
- 2) 仅相间滤波。

这些滤波器价格昂贵且还有其他局限性。它们阻止电动机电压超出 90% 的电源电压(从而可降低变频器的定额)。该滤波器也不适用于对动态性能要求较高的场合。

9.2.5 电动机线端装置

电动机线端装置可与电动机端子连接,使电动机阻抗和电缆阻抗相匹配,从而可防止电压反射。在图 28 d)的示例中,峰值电压仅为 800 V,上升时间为 2 μs。这类滤波器通常会增加约 0.5%~1.0%的损耗。

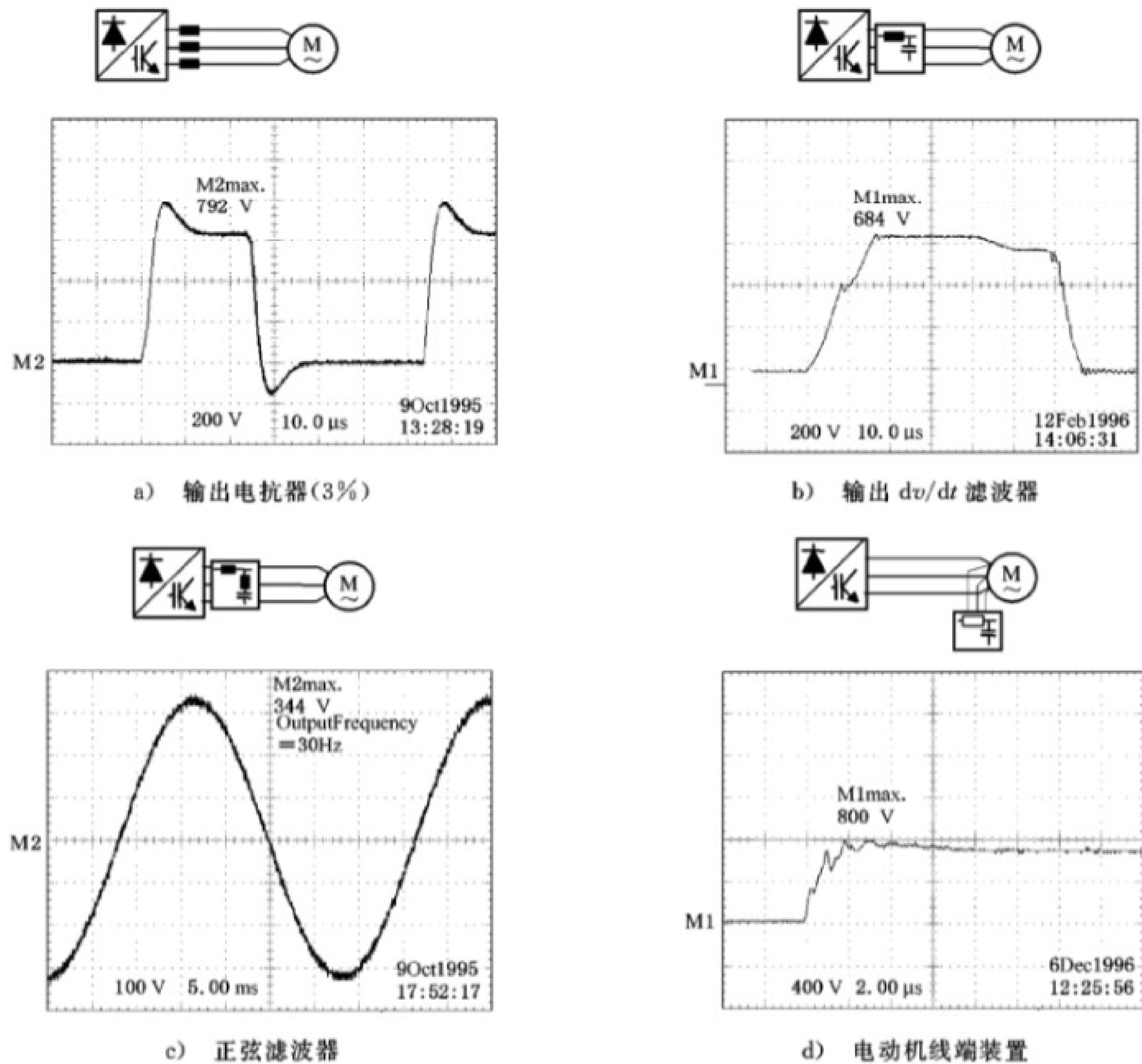


图 28 预防性措施的特性

附录 A
(资料性附录)
变频器输出频谱

变频器输出电压波形乃至输出电压频谱,随着变频器输出电压产生的方法不同而不尽相同。图 A.1 a)和图 A.1 b)所示分别为恒频(约 2.5 kHz)切换和滞后切换(平均频率约 2.2 kHz)变频器的输出频率成分。图 A.2 所示为一个随机频率(平均约 2.2 kHz)PWM 变频器和一个滞后切换变频器的典型频谱对比。输出至电动机的频率都约为 40 Hz,电动机负载特性保持恒定。滞后或随机频率 PWM 切换的频率成分的幅值通常比恒定频率 PWM 开关的幅值低,但在频率范围的分布较广。

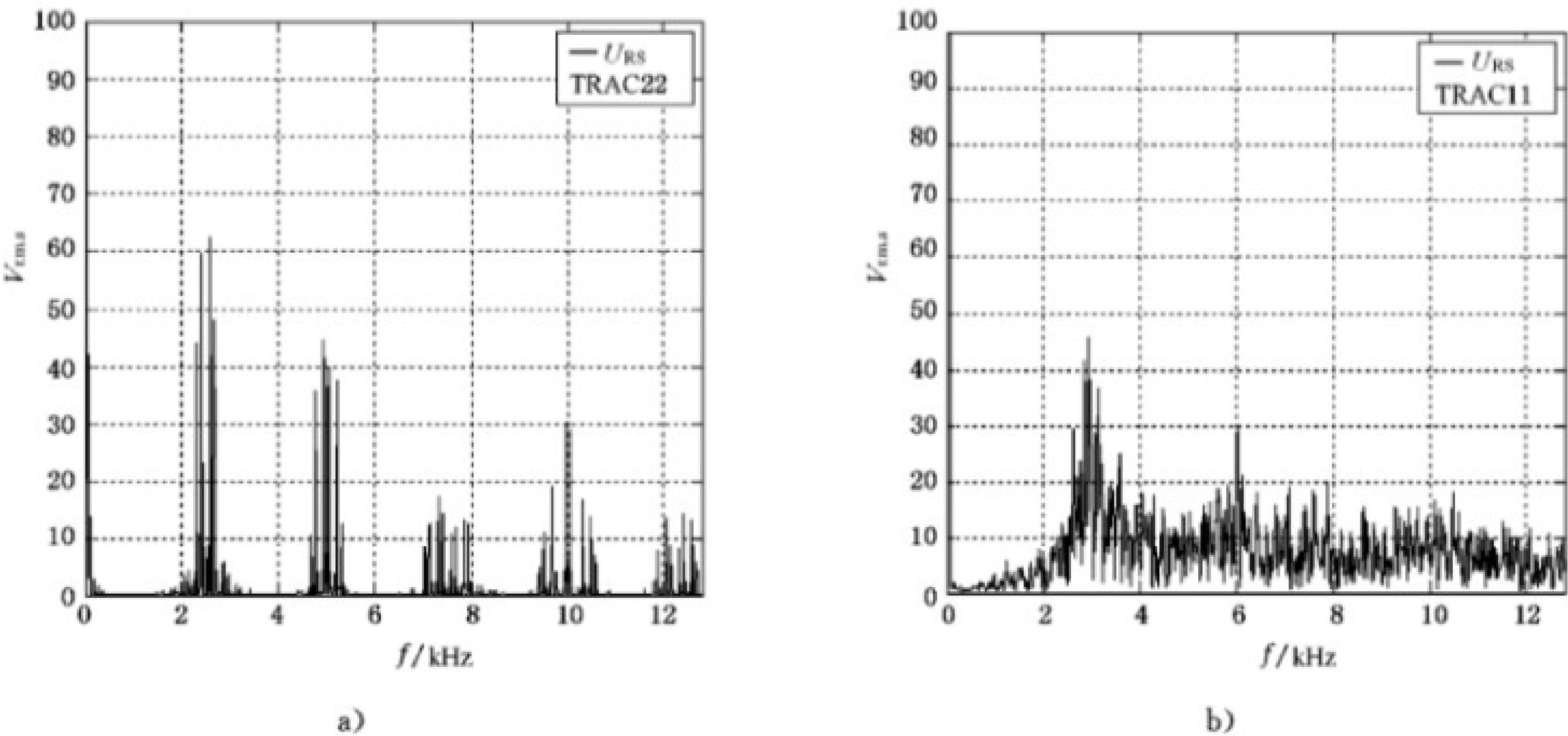


图 A.1 a)恒频 PWM 切换和 b)滞后切换下变频器输出电压的典型频谱

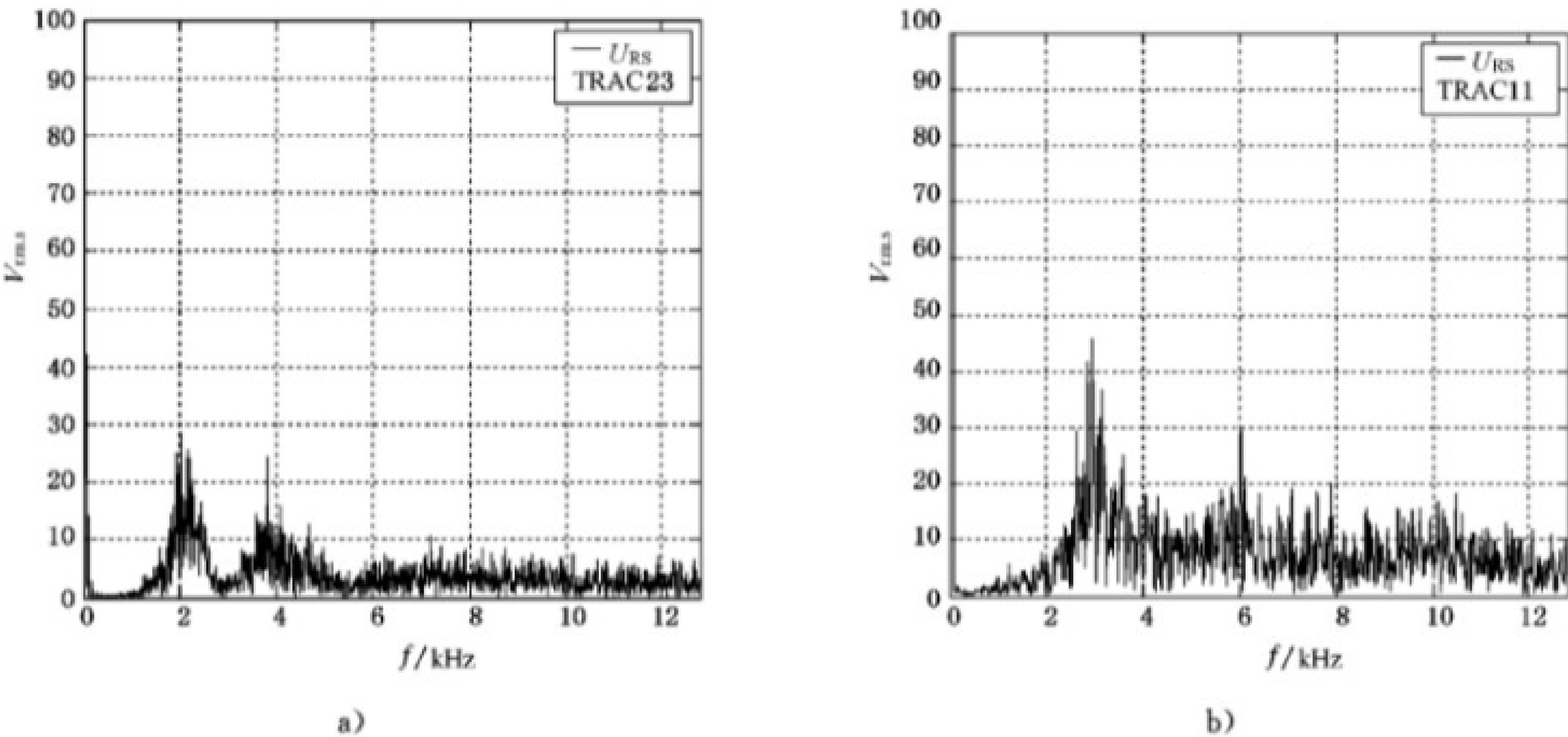


图 A.2 a)随机频率 PWM 切换和 b)滞后切换下变频器输出电压的典型频谱

图 A.3 所示为典型的(标准的)由恒定频率 PWM 切换(图 A.3 a))和滞后切换(图 A.3 b))变频器供电的电动机电流时间特性。输出至电动机的频率约为 10 Hz。

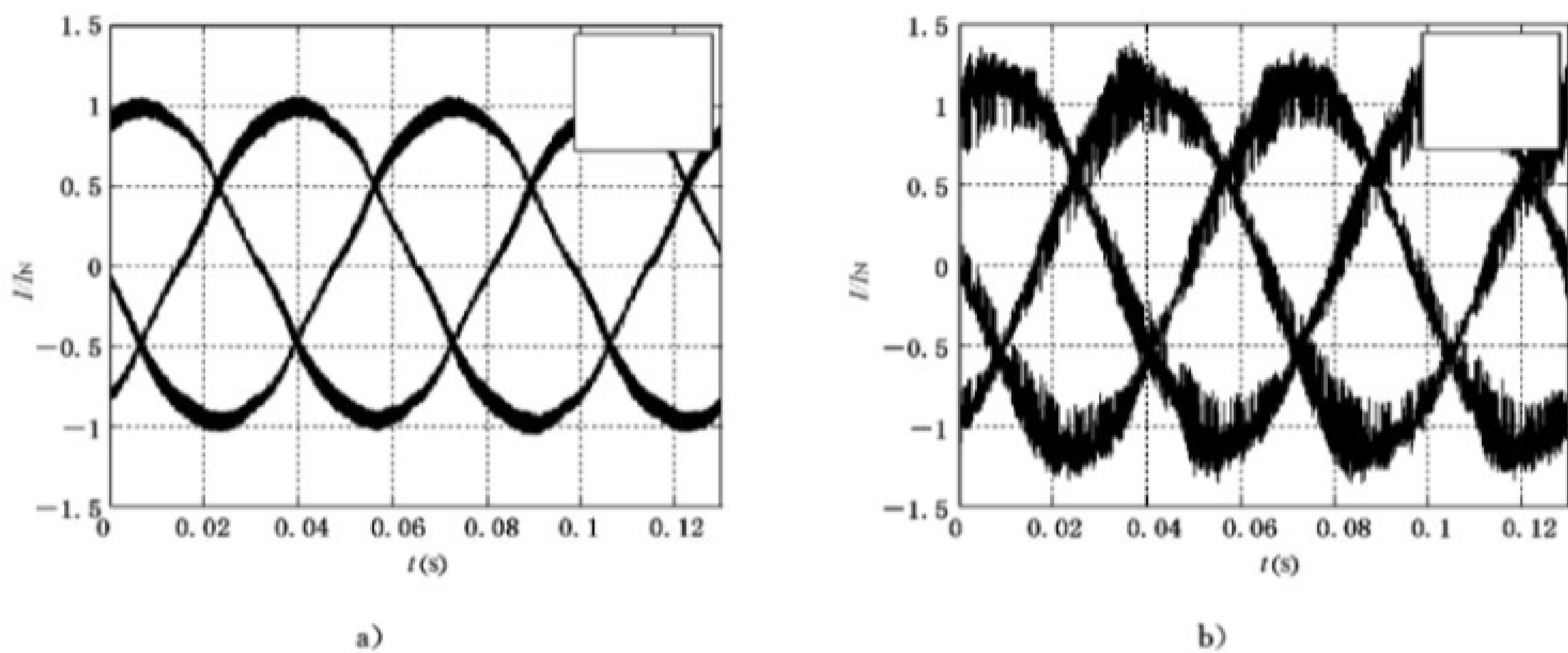


图 A.3 典型的由恒定频率 PWM 切换和滞后切换变频器供电的电动机电流时间特性

注：图 A.1、图 A.2 和图 A.3 仅为图解，并不能用来验证如上电压产生方是否合格，所有输出电压的产生方法均可进行特殊优化以平衡应用中的优点和缺点。
对系统噪声的影响见第 6 章。



GB/T 21209-2007

版权专有 侵权必究

*

书号:155066 • 1-31160

定价： 26.00 元