

吴广宁 周凯 高波 著

# 变频电机绝缘老化 机理及表征



科学出版社  
www.sciencep.com

# 变频电机绝缘老化 机理及表征

吴广宁 周 凯 高 波 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书全面系统地阐述了变频电机绝缘老化、失效机理及其表征方法。全书共分10章,介绍了变频电机绝缘的特点、构成,阐述了变频电机绝缘面临的主要问题;介绍了绝缘材料的理论基础,研究了变频电机绝缘过电压的形成机理及其影响因素;基于高压方波脉冲的绝缘老化试验系统,研究了高压方波脉冲电压下的局部放电行为和空间电荷特性;通过进行不同电压幅值、频率、温度下的老化试验和寿命试验,分析了局部放电参量、介电性能及空间电荷特性随老化的变化规律,得出了连续高压方波脉冲下的寿命模型以及绝缘老化的影响因素和寿命的表征参量。

本书不仅理论方法先进,而且工程应用性很强,适合从事交流变频绝缘技术研究及绝缘材料研制的科研人员,从事变频电机设计、制造、运营管理及维护的工程技术人员,高等学校高电压与绝缘技术专业、电机与电器专业的教师及研究生阅读。也可供准备从事变频电机绝缘研究的科技人员和大学生作为了解专业基础的参考书目。

### 图书在版编目(CIP)数据

变频电机绝缘老化机理及表征/吴广宁,周凯,高波著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023789-7

I. 变… II. ①吴…②周…③高… III. 变频机-绝缘-老化-研究  
IV. TM344.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 202286 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:李奕萱

责任印制:赵 博/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年2月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—3 000 字数:392 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

本书的研究工作及出版得到下列基金资助:

**国家自然科学基金项目:**高速机车牵引电机绝缘电老化机理及表征的研究(50377035)

**霍英东教育基金会项目:**高速机车牵引电机绝缘老化机理的研究(91060)

**国家自然科学基金与韩国科学与工程基金联合资助项目:**电缆造成变频调速牵引电机绝缘系统破坏的机理与对策(50610155)

**教育部博士点基金项目:**脉冲电压下空间电荷影响绝缘材料老化、失效机理的研究及表征(20050613008)

**教育部科学技术研究重点项目:**变频电机纳米绝缘材料耐电晕特性的研究(106136)

**四川省杰出青年基金项目:**牵引供电设备绝缘状态在线监测及故障诊断的关键技术研究(460)

**中国南车集团株洲电力机车厂资助项目:**PWM 变频调速牵引电机局部放电绝缘破坏的研究

**清华大学电力系统和大型发电机设备安全控制及仿真国家重点实验室开放研究课题基金项目:**PWM 变频调速牵引电机绝缘破坏机理研究(04-3)

**中国科学院科学出版基金:**变频电机绝缘老化机理及表征

## 前 言

随着我国经济的快速发展,铁路“瓶颈”在新一轮经济增长中的制约作用日益突出,加快铁路发展,大力发展高速铁路,形成覆盖全国主要城市,安全舒适、快捷高效的铁路运输网络已成为经济和社会发展的需求。“十一五”期间我国将建设9800km 客运专线,在13000km 提速干线实现客车时速达到200km。高速动车组普遍采用变频调速交流传动系统,变频调速牵引电机是高速动车组的关键设备之一,其安全、可靠性直接影响高速动车组的性能。变频调速牵引电机绝缘长期承受连续高压方波脉冲电压的作用,出现了定子绝缘过早失效的情况。研究发现变频电机定子绕组绝缘承受的不再是传统的正弦电压而是连续高压方波脉冲。高压方波脉冲使得定子绕组绝缘承受更高的电压,频率可达20kHz;高频作用使得介质损耗、局部放电、空间电荷对绝缘的老化作用加剧,导致绝缘过早失效。传统交流电动机绝缘设计方法已不能满足变频调速牵引电机绝缘的实际需要,而PWM 高压方波脉冲下绝缘系统的老化机理以及寿命模型理论尚属空白,因此对变频电机绝缘技术进行系统地研究已迫在眉睫。

本书是在国家自然科学基金——高速机车牵引电机绝缘电老化机理及表征的研究,霍英东教育基金——高速机车牵引电机绝缘老化机理的研究,国家自然科学基金与韩国科学与工程基金联合资助项目——电缆造成变频调速牵引电机绝缘系统破坏的机理与对策,教育部博士点基金——脉冲电压下空间电荷影响绝缘材料老化、失效机理的研究及表征等项目的支持下,经过7年多的研究,并在借鉴国内外相关研究成果的基础上撰写而成的。为开展该领域的研究奠定了理论基础,可为变频电机绝缘设计、制造、运行维护提供技术支持。

本书主要内容为变频电机绝缘的老化机理及其检测方法,围绕变频调速牵引电机绝缘的老化特征,对其影响因素进行深入的分析研究与试验,为最终提出其破坏机理、寿命模型及其绝缘状态的检测方法逐步展开。通过本书的学习可使读者掌握变频电机设计、运行的理论基础,为培养变频电机的设计、生产、运行及维护等专门人才打下良好的专业技术基础,为开展变频电机绝缘技术的进一步深入研究打下了坚实的基础。

本书是作者和课题组长期研究工作的结晶。参加工作的人员有吴广宁、佟来生、高波、周凯、张丽丽、温凤香、林同光、张国钦、刘曦、邓桃、刘君、吴建东、何景彦、雷克刚、郭小霞、周力任、曹开江等。吴广宁负责全书统稿,高波协助统稿并承担出版过程中的相关工作。

本书还得到了哈尔滨理工大学雷清泉院士、西南交通大学钱清泉院士、清华大学谈克雄教授、西安交通大学屠德民教授的指导和帮助,在此一并致谢。

由于本书作者水平有限,加之变频电机绝缘技术正在迅猛发展,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 变频电机及其特点	1
1.1.1 电机的发展概况	1
1.1.2 变频电机的特点	3
1.1.3 变频电机的绝缘技术	4
1.2 变频电机绝缘的现状	5
1.2.1 变频电机绝缘的特殊性	5
1.2.2 变频电机绝缘的过早失效	6
1.2.3 国内外变频电机绝缘的研究进展	7
1.3 变频电机绝缘的问题	8
1.3.1 电机绝缘材料的要求	8
1.3.2 传统绝缘结构与工艺的不足	9
1.3.3 严酷的电气环境	10
1.3.4 变频电机绝缘的改进	13
1.4 变频电机绝缘技术展望	15
参考文献	16
第 2 章 变频电机绝缘材料的物理基础	19
2.1 介电材料的基本性能与极化	19
2.1.1 介电材料的宏观性质	19
2.1.2 化学键	21
2.1.3 介电材料的极化与松弛	24
2.2 热刺激电流	26
2.2.1 热刺激电流的宏观与微观表现	27
2.2.2 热刺激松弛和松弛时间	29
2.2.3 空间电荷的热刺激电流	33
2.3 局部放电的原理	41
2.3.1 局部放电的等效模型	41
2.3.2 局部放电的特点	43
2.3.3 局部放电对固体绝缘的危害	46

2.4	介电谱的基本理论	47
2.4.1	电偶极矩	47
2.4.2	德拜方程	49
2.4.3	Cole-Cole 图	50
	参考文献	51
<b>第3章</b>	<b>纳米绝缘材料的表面与界面</b>	<b>54</b>
3.1	材料的表面与界面	54
3.1.1	材料的表面	54
3.1.2	材料的界面	59
3.2	纳米材料的表面与界面特性	65
3.2.1	纳米材料及微粒特性	65
3.2.2	纳米材料的表面性质	68
3.2.3	纳米材料的界面理论	70
3.2.4	纳米材料与绝缘介质的性能	75
3.3	纳米材料表面与界面的表征	78
3.3.1	纳米材料的显微图像分析	78
3.3.2	X 射线电子能谱	82
3.3.3	红外和拉曼光谱	85
	参考文献	87
<b>第4章</b>	<b>变频电机绝缘材料及结构</b>	<b>90</b>
4.1	变频电机绝缘材料	90
4.1.1	绝缘材料耐热等级评定	90
4.1.2	常用绝缘材料的特性	92
4.1.3	聚酰亚胺纳米绝缘材料	95
4.2	变频电机绝缘结构	100
4.2.1	低压电机的绝缘结构	100
4.2.2	高压电机的绝缘结构	102
4.2.3	电机线圈的匝间绝缘	103
4.3	变频电机绝缘工艺	104
4.3.1	防电晕漆包技术	104
4.3.2	高性能绕包技术	105
4.3.3	绝缘材料新工艺	106
4.3.4	变频牵引电机 200 级绝缘	109
	参考文献	110



<b>第 5 章 变频电机过电压及其特征</b> .....	113
5.1 PWM 脉冲的传播特性 .....	113
5.1.1 PWM 脉冲波形特征 .....	113
5.1.2 反射波和折射波的产生 .....	114
5.1.3 PWM 脉冲波在电缆上的传输反射过程 .....	118
5.2 电机端电压波形及其影响因素 .....	120
5.2.1 电机端过电压 .....	121
5.2.2 脉冲上升沿时间和电缆长度的影响 .....	123
5.2.3 电机端过电压的抑制 .....	125
5.3 绕组内部电压分布及其影响因素 .....	130
5.3.1 定子绕组分布参数电路模型 .....	131
5.3.2 绕组内部电压分布特性 .....	138
5.3.3 脉冲上升沿时间和电缆长度的影响 .....	140
参考文献 .....	143
<b>第 6 章 电机绝缘老化与试验系统</b> .....	146
6.1 变频电机绝缘的老化 .....	147
6.1.1 电老化 .....	147
6.1.2 热老化 .....	147
6.1.3 其他因素造成的老化 .....	148
6.2 脉冲电压下的绝缘寿命 .....	150
6.2.1 单因子老化模型 .....	151
6.2.2 多因子老化模型 .....	155
6.3 基于高压方波脉冲的绝缘老化试验系统 .....	156
6.3.1 绝缘老化试验系统的发展 .....	157
6.3.2 试验系统原理 .....	158
6.3.3 高频脉冲电源 .....	159
6.3.4 高频脉冲变压器 .....	165
6.4 绝缘状态常规检测方法 .....	171
6.4.1 绝缘电阻和吸收比 .....	171
6.4.2 泄漏电流测量 .....	174
6.4.3 介质损耗测量 .....	175
6.4.4 局部放电测量 .....	180
参考文献 .....	182
<b>第 7 章 高压方波脉冲下的局部放电</b> .....	185
7.1 局部放电的测量及统计 .....	185

7.1.1	局部放电的测量 .....	185
7.1.2	放电信号的特征提取 .....	191
7.1.3	高压方波脉冲下局部放电信号的统计 .....	195
7.2	局部放电的特征 .....	204
7.2.1	不同脉冲波形下的起始放电电压 .....	204
7.2.2	波形参数对放电特征参量的影响 .....	206
7.2.3	局部放电的相位分辨模式 .....	210
7.3	局部放电影响机理分析 .....	213
7.3.1	聚酰亚胺薄膜的局部放电 .....	213
7.3.2	电磁线的局部放电 .....	219
7.3.3	脉冲波形对局部放电参数的影响 .....	220
	参考文献 .....	222
<b>第8章</b>	<b>高压方波脉冲下的介电谱 .....</b>	<b>225</b>
8.1	介电谱的测量 .....	225
8.1.1	电介质的极化与损耗 .....	225
8.1.2	介电谱的测量 .....	230
8.1.3	影响介质损耗的因素 .....	231
8.2	聚酰亚胺薄膜的介电谱特性 .....	234
8.2.1	未老化膜的介电谱 .....	234
8.2.2	老化不同时间后的介电谱 .....	236
8.2.3	不同老化频率下的介电谱 .....	240
8.3	电磁线的介电谱特性 .....	242
8.3.1	老化不同时间电磁线的介电谱 .....	242
8.3.2	不同频率老化电磁线的介电谱 .....	245
	参考文献 .....	247
<b>第9章</b>	<b>高压脉冲条件下的空间电荷 .....</b>	<b>250</b>
9.1	空间电荷测量装置 .....	250
9.1.1	空间电荷测量技术 .....	250
9.1.2	热刺激电流测量装置 .....	251
9.1.3	空间电荷分布的测量装置 .....	253
9.2	热刺激电流测量及分析 .....	261
9.2.1	测量方法 .....	261
9.2.2	热刺激电流分析方法 .....	264
9.3	高压方波脉冲电压老化绝缘的热刺激电流特征 .....	268
9.3.1	不同老化时间的热刺激电流 .....	268

---

9.3.2 频率寿命曲线和热刺激电流 .....	271
9.3.3 寿命测试 .....	271
9.3.4 热刺激电流测试 .....	272
9.4 不同脉冲参数对空间电荷行为的影响 .....	275
9.4.1 不同参数的脉冲注入后的 TSC 分析 .....	276
9.4.2 不同脉冲的空间电荷分布 .....	276
参考文献 .....	278
<b>第 10 章 变频电机绝缘老化及表征 .....</b>	<b>281</b>
10.1 绝缘老化试验设计 .....	281
10.1.1 试验方案设计 .....	281
10.1.2 绞线对试样设计 .....	281
10.2 介电性能随老化时间的变化特征 .....	282
10.2.1 不同老化条件下绞线对的介电特性 .....	282
10.2.2 介质损耗随老化时间的变化特征 .....	286
10.3 基于局部放电的老化表征参量 .....	289
10.3.1 匝间绝缘的电热联合老化 .....	289
10.3.2 对地绝缘的电热联合老化 .....	295
10.4 高压方波脉冲下的绝缘老化机理分析 .....	299
10.4.1 聚酰亚胺薄膜的扫描电镜分析 .....	299
10.4.2 绝缘老化分析 .....	304
10.4.3 绝缘老化机理 .....	307
参考文献 .....	308

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 变频电机及其特点

### 1.1.1 电机的发展概况

电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等，都必须利用电机作为能量转换的机电装置。在电力工业中，发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备。在工业企业中，大量应用电动机作为原动机去拖动各种生产机械。如在机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、电铲、轧钢机、吊车、抽水机、鼓风机等都要用大大小小的电动机来拖动；在自动控制技术中，各式各样的小巧灵敏的控制电机广泛地被作为检测、放大、执行和解算元件。

不论是旋转电机的能量转换，还是控制电机的信号变换，都是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机内部的电磁过程及其所表现的特性时，要应用有关电和磁的规律，如电路第一、第二定律，全电流定律，电磁感应定律和电磁力定律等。但是，电机毕竟是一种机械，除电磁规律以外，还涉及结构、工艺、材料等方面的问题，所以电机在拖动系统中是一种综合性的装置或元件。

电机随着生产发展而产生和发展，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。在由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代的今天，不仅对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等方面的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论上，发展出多种高精度、快响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。与此同时，电力电子学等学科的渗透使电机这一较为成熟的学科得到新的发展。

新中国成立以来，我国的电机制造工业发生了巨大变化，不仅建成了独立自主和完整的体系，而且有些产品已经达到或接近世界先进水平。就各种拖动系统中的主要设备——电动机而言，近年来已生产了不少大型的直流电动机、异步电动机和同步电动机；在中小型电机和控制电机方面，亦自行设计和生产了不少新系列电机。由于生产上的需要，最近几年来，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法，亦进行了许多摸索、研究和试验工作，取得了不少成就。

当前科学技术突飞猛进，因此电机在制造上也向着大型、巨型发展。中小型电机正向多用途、多品种及高效节能的方向发展。在应用上，由于计算机技术迅速发展，将会出现由机器人工作的无人工厂，以计算机作为这些工厂的“中枢神

经”，实现无人化。在这种时代下，某些特种电机必须具有快速响应、模仿性运动、快速启动和停止等比人的手脚更复杂而精巧的运动。理论上，在电机中应用了控制技术，使电机具有更良好的特性，使各类电机成为各种机电系统中一种极其重要的部件。

电机作为电力机车的关键部件之一，早已在铁路发展中起了重要的作用，对高速铁路发展的贡献尤为突出。按照传统约定，速度超过 200km/h 的列车为高速列车。自 1964 年日本东海道干线投入运行至今，高速铁路已有 40 多年的历史，高速列车也出现了多种形式。国外高速列车的主要技术参数如表 1.1 所示。

表 1.1 国外高速列车主要技术参数

国名	列车名称	最高速度/(km/h)	总功率/kW	牵引传动方式
日本	300 系	270	12000	交流异步电动机
	500 系	300	18240	交流异步电动机
	700 系	285	13200	交流异步电动机
法国	TGV-A	300	8800	交流同步电动机
	EUROSTAR	300	12200	交流异步电动机
	KOREA, TGV	300	13200	交流同步电动机
德国	ICE3	330	9600	交流异步电动机
意大利	ETR-500	275	8800	交流异步电动机

20 世纪初最早的电力机车和城市电车都是采用直流电源和直流牵引电动机。随着列车运行速度的提高，所需的牵引功率不断增大，为了提高牵引网电能的传输功率，采用高压交流电源为电力机车供电，而牵引电动机则多采用直流电机，这种传动系统叫做交-直流电传动系统。例如日本的 0 系和 100 系，法国的 TGV-PSE，英国的内燃动车组，以及我国现在运行的东风型内燃机车和韶山型电力机车，都采用交-直流电传动系统。

交-直流电传动系统是从电网上获取高压交流电，通过变压器降压，再通过整流器将交流电整流成直流电传给直流牵引电机。交-直流传动系统的最大优点是直流牵引电机调节速度非常方便，只要控制电机电压即可控制速度。其主要缺点是机车功率因数较低，不能充分发挥变压器的容量，传动功率和传动效率较低。如果列车要求最高速度超过 250km/h 或 300km/h，直流牵引电机因为有整流子体积庞大，在机车下面难于安装，采用交-直流传动将有困难。此外，系统中会有高次谐波，对沿线通信线路有干扰；直流牵引电机的地线通过钢轨接地，会对地下的金属管道产生电腐蚀作用。

20 世纪 70 年代后期，随着电力电子技术的发展，大功率电子半导体器件的

出现,在微电子技术和自动控制技术基础上,制成了体积小、功率大、效率高的变频调速装置。这些高新技术的发展使交流牵引电机能在高速动车组中得到应用,出现了交-直-交流电传动系统。它的工作原理是将电网上的高压交流电,通过变压器降压和四象限整流器转换成直流电,再经过逆变器将直流电转换成可调压调频的交流电,输入三相异步(或)同步牵引电动机,带动车轮运行。

为了体现交流传动牵引机车中牵引电机运行状况的特殊性,本书把由逆变器驱动的异步牵引电动机简称为“变频电机”。

### 1.1.2 变频电机的特点

随着日本、法国和德国高速铁路投入运营并取得成功,磁悬浮试运行线在上海开通,我国正逐步形成高速铁路热。我国的铁路运输一直处于十分紧张的状态,有些线路已经超负荷运行,发展高速铁路迫在眉睫。高速牵引机车是高速铁路发展的关键,随着大功率开关器件的开发及应用,出现了采用调节频率和电压的交流电机调速方式,从而机车牵引传动进入了交流传动时代。交流传动机车对于提高牵引、制动性能和实现高速度,以及减轻簧下重量、改善动力学性能、提高机车运行经济性具有传统直流传动机车难以企及的优越性,已经成为轨道交通牵引动力的发展方向,成为我国铁路提速、重载必需的装备。

交-直-交流电传动系统的优越性非常显著,目前在德国、日本和法国新研制的高速电力机车和动车组上应用,并代表了高速机车传动方式的发展方向。其主要优点有:①起动牵引力较大,恒动调节速度的范围较宽,有良好的黏着利用特性和自动防车轮空转的性能;②三相异步交流电机,功率大,体积小,重量轻,维修简单,可减轻簧下重量,有利于列车高速运行;③机车的功率因素接近于1.0(交-直传动系统为0.85),谐波电流小,减轻了对通信系统的干扰;④在机车制动时,可使交流电返回电网,实现再生制动,节省能源。

近年来,牵引电机正在逐渐向大功率化、小型轻量化、快速化、高速化方向发展。变频交流电机通过变频器完成输出电压幅值、频率的调制,这个调制主要是逆变器按脉宽调制的方式来完成的。因而逆变器起着重要的作用,70年代中期以前,逆变器几乎都采用无自关断能力的晶闸管,到70年代中期以后,随着电力电子技术的发展,逆变器由具有自关断能力的主开关元件组成,出现了脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)的控制方式<sup>[1]</sup>,从而机车的功率得到了大大提高,同时机车速度也获得了巨大提升,达到了300km/h以上,世界各国也趁此机会大力发展高速列车,掀起一股高速列车热潮。表1.2是国际上高速列车的试验速度<sup>[2]</sup>。

表 1.2 高速列车试验速度

国别	列车型号	最高试验速度/(km/h)
法国	V150	574.8
德国	ICE/V	406.9
日本	300X	443

1996年6月我国研制成功的第一台交-直-交流电传动电力机车 AC4000 型, 采用三相交流异步牵引电动机, 每台电机功率为 1025kW, 重量为 2.44t。功率比现用的直流牵引电机大 28%, 重量轻 38%, AC4000 型电力机车虽然仅是常速电力机车, 但它的试制成功, 为我国高速机车的发展跨出了关键的一步。

### 1.1.3 变频电机的绝缘技术

随着电力机车向高速、重载方向发展, 对牵引电机的性能要求越来越高。由于牵引电机受机车安装空间的制约, 其体积受到严格限制, 因此只能尽量减薄绝缘厚度, 提高槽满率, 从而达到增加牵引电机功率的目的。过去牵引电机采用 B-F 级绝缘结构, 绝缘等级低, 耐热等级只能达到 130~150℃, 机械性能、绝缘结构的整体性能都较差, 经常导致电机局部过热, 破坏绝缘结构, 从而引发故障, 严重影响行车安全。近年来随着绝缘材料的不断发展和更新, 更高耐热等级的绝缘材料不断应用在牵引电机上, 如环氧树脂、聚酯树脂、聚酰亚胺树脂和聚二苯醚树脂等。变频调速牵引电机绝缘除了要有良好的耐热性能外, 还需要具有优良的耐电晕能力, 广泛采用纳米聚酰亚胺薄膜作为主要绝缘材料。新型绝缘材料的应用, 提高了牵引电机的槽满率和比容量, 见表 1.3。

表 1.3 电机绝缘对比容量的影响

电机型号	绝缘等级		单台功率/kW	单台重量/kg	比容量/(kW/kg)
	定子	转子			
ZQ-650-1	H	B	650	4000	0.163
ZQ-800-1	H	F	720	4000	0.180
ZQ-850-1	H	F	850	4000	0.214
ZD115	H	H	900	3550	0.254
ZD118	200℃	200℃	1000	3550	0.282

通过实际交流传动机车的运营, 大功率 IGBT (insulated gate bipolar transistor, 绝缘栅双极型功率管) 逆变器以其特有的优势已得到广泛关注, 但在变频条件下对变频电机的绝缘结构、绝缘材料亦提出了更高要求。根据国外高速列车牵引电机的有关运行经验, 采用 IGBT 器件的 PWM 变频器, 由于其工作方式

导致了绝缘过早损坏的情况<sup>[3~6]</sup>，这将直接影响到铁路运营系统的安全。

多年来牵引电机绝缘的性能评定都是在现场进行的，评定周期长，数据积累不方便，无法在较短的时间里得出绝缘的评价结果。而绝缘结构的合理设计要建立在完整的结构评定试验基础上，功能评定结果的缺乏致使绝缘结构设计存在一定的盲目性，加大了设计难度。特别是交流牵引电动机，由于逆变器供电电压的特殊性，耐电晕性能成了电机绝缘性能的重点，而目前国内还没有一种有效的试验手段能在较短的时间内评定逆变器供电牵引电机绝缘结构的耐电晕寿命，如果用实际应用来评定，时间上无法适应牵引电机发展的需要。

因此，研究变频电机绝缘技术，确定反映绝缘性能的特征参量，为开发适宜于交流变频电机运行环境的绝缘评定系统提供理论基础，对我国高速动车组牵引电机的设计、生产及运营维护都具有重要的理论和实际意义。

## 1.2 变频电机绝缘的现状

### 1.2.1 变频电机绝缘的特殊性

变频电机广泛采用了 PWM 调制驱动，其输出波形为不同脉宽的方波，对电压进行调制使电机绕组内通过的电流波形接近正弦电流，如图 1.1 所示。其载波频率范围为几百 Hz 到几千 Hz 最高可达到 20kHz。变频电机绝缘要不断地承受高频率不同脉宽的方波电压冲击，在电机转子中由于高频电流所引起的集肤效应可使转子电阻增大，则转子导体的铜耗也随之增加，导致电机绕组发热增大，对电机绝缘不利，也降低了电机利用效率。高频谐波磁通所引起的负载杂散损耗的某些分量也将增大。当普通异步电动机采用变频器供电时，会使由电磁、机械、通风等因素引起的震动和噪声变得更加复杂。变频电源含有的各次谐波相比于电动机固有空间谐波相互干涉，形成各种电磁激振力。当电磁力波的频率与电动机机体的固有振动频率一致或者接近时，将产生共振现象，从而加大噪声。由于电动机工作频率范围宽，转速变化范围大，各种电磁力波的频率很难避开电动机各

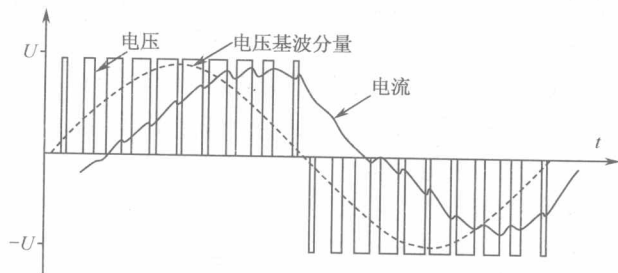


图 1.1 PWM 变频电源输出电压和电流示意图



部件的固有震动频率。因此，变频电机在运行中轴承的机械磨损非常严重<sup>[7]</sup>。

PWM 调制驱动一般都采用了 IGBT 作为功率驱动元件。IGBT 的开关速度可以达到 50ns，则 PWM 输出电压方波的上升时间非常短可达  $10\text{kV}/\mu\text{s}$ ，当具有如此快上升时间的电压施加到电机的绕组时，将在绕组产生不均匀的匝间电压分布。同时，会在电机端部产生电压波的折反射现象，导致过电压的出现<sup>[8~16]</sup>。图 1.2 中给出了变频器输出电压为 480V，变频器到电机电缆长度为 46m 时电机端部电压峰值与上升时间的关系图。

总的来说变频电机工作在高频陡上升沿方波电压下，与传统的工频正弦交流电压形式截然不同，所面临的问题远比传统电机复杂苛刻。这就使变频电机的绝缘系统相对于传统电机绝缘有了很大的特殊性。

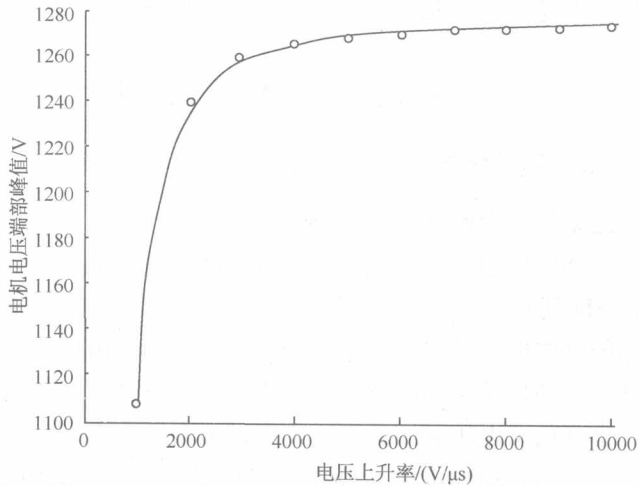


图 1.2 电机端部电压峰值与上升时间的关系图

### 1.2.2 变频电机绝缘的过早失效

在高频脉冲输入条件下，绕组绝缘失效的主要原因是电压过高引起绝缘局部击穿<sup>[7,17~21]</sup>。异步牵引电动机的输入电压是以 PWM 形式供电，PWM 驱动脉冲波形有两种频率，其一是开关频率，尖峰电压的重复频率与开关频率成正比；另一是基本频率，直接控制电机的转速。在每一个基本频率开始时，脉冲极性从正到负或从负到正，这一时刻电机绝缘承受着二倍于尖峰电压值的全幅电压。在此全幅电压作用下，绕组匝间会产生局部放电。因而在运行中，交变电压特别是峰值电压将导致线圈绝缘层产生局部放电，其放电产生的能量及生成物将逐渐腐蚀绝缘层。同时由于电离作用，在气隙中又会产生空间电荷，从而形成一个与外加电场反向的感应电场。当电压极性改变时，这个反向电场与外加电场方向一致。