

国外机械工业基本情况

国外牵引电气设备 基本情况和发展动向

湘潭牵引电气设备研究所 吴式贤主编

.61

机械工业出版社
1994 年

出版说明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供实用、先进的技术装备的重任。为适应社会主义市场经济体制的发展要求,必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平,提高经济效益,是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训,了解国外机械工业的生产、技术和管理水平,以便探索我国机械工业在社会主义市场经济体制下的自我完善的发展道路,我们组织编写了第四轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前三轮的基础上,围绕我国机械系统各行业的发展战略,针对我国机械工业的技术发展的实际要求,全面系统地介绍国外机械系统各行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况,着重报道了国外机械工业 80 年代中后期到 90 年代初期的水平及到本世纪末的发展趋向。

第四轮《国外机械工业基本情况》共 60 多分册,参加编写人员达 500 多人。本书为《牵引电气设备》分册,由湘潭牵引电气设备研究所吴式贤主编,长沙铁道学院李强北副主编,南方通用电气集团公司(湘潭电机厂)池耀田主审。参加编写人员有吴式贤(第一、九章)、卫品贤(第二、八章)、韦国清(第二章的绝缘材料和工艺部份)、赖裕凯(第三章)、冯廷龄(第三章的制造工艺部分)、莫灼球(第四章)、陈德铭(第四章的牵引齿轮热处理部份)、夏梁耀(第五章)、傅伍良(第五章的焊接工艺部份)、陈石勋(第六章)、林镇鉴(第七章)、夏寿芝(第七章的转向架部份)、李强北(第十章和附录)。审稿人还有段家典、周联保、许昌、朱菱、徐渭浩、朱汉寿、曹汀、鄢伟扬(燕山大学)、吴济钧(西安电力电子技术研究所)、连级三(西南交通大学)。责任编辑:李宜春。

机械工业部科技信息研究院

1994 年 10 月

前 言

随着我国现代化建设迅猛进展,能源短缺、交通阻塞和环境污染,正在成为当前急待解决的三个“瓶颈”问题。根据机械工业部下达编写第四轮国外机械工业基本情况系列丛书的任务,湘潭牵引电气设备研究所组织编写了《国外牵引电气设备基本情况和发展动向》,以便借鉴国外经验,“洋为中用”,为探索我国城市交通、铁路运输和工矿运输的今后发展道路,提供新的思路。

牵引电气设备从广义来说,是指由电动机作动力的交通运输设备。如城市电车、地铁车和轻轨车;工矿运输用工矿电机车、电传动矿用自卸车和蓄电池工业车辆;铁道干线用电力机车、电传动内燃机车;以及正在开发中的电动汽车和磁浮列车。而且还包含上述车辆用牵引电机、电器和电控系统。

本书选择能代表牵引电气设备当代水平的产品,查阅大量国外最新文献编写而成。力求以新颖性、先进性和实用性贯串于全书各章节。书中编入的大量图表,给出了技术性能参数和技术经济指标,可作为新产品开发人员进行国内外水平对比分析的依据。书中论述的产品和关键部件制造工艺内容,主要是将出国考察或实习期间收集的信息资料整理而成。参加编审人员是从事牵引电气设备或自动化控制技术岗位工作三十多年的高级工程师和教授。因此,本书的出版是集体智慧的结晶,也是科研院所和厂校共同协作的劳动成果!

由于技术不断更新和发展,书中错漏之处在所难免,恳请读者和专家指正。

编 者

1994 年 10 月

目 录

第一章 自关断电力电子器件 在电力牵引中的应用

1.1 适用于电力牵引的自关断 电力电子器件的现有水平	(1)
1.1.1 可关断晶闸管(GTO)	(1)
1.1.2 大功率晶体管(GTR)和功 率场效应晶体管(Power MOSFET)	(1)
1.1.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(2)
1.1.4 MOS 控制晶闸管(MCT)	(2)
1.1.5 功率集成电路(PIC)	(3)
1.1.6 智能模块	(3)
1.2 自关断电力电子器件在车 用辅助电源装置中的应用	(3)
1.2.1 对车用辅助电源装置的要求	(3)
1.2.2 用自关断器件的车用辅助 电源装置电路方式比较	(3)
1.2.3 升降压限制式车用辅助电 源装置	(4)
1.2.4 IGBT 辅助电源装置	(5)
1.3 自关断电力电子器件在直 流传动车辆上的应用	(6)
1.3.1 GTO 斩波器的优越性	(6)
1.3.2 GTO 斩波器在地铁和轻轨 车上的应用概况	(7)
1.3.3 GTR 和 MOSFET 斩波器 在蓄电池车辆上应用概况	(8)
1.4 自关断电力电子器件在交 流传动车辆上的应用	(9)
1.4.1 车辆采用交流传动的优越性	(9)
1.4.2 交流传动的地铁和轻轨车 发展现状	(10)
1.4.3 VVVF 逆变器主电路	(13)

1.5 几项关键技术的发展趋向	(17)
1.5.1 自关断电力电子器件的发 展趋势	(17)
1.5.2 车辆用自关断电力电子器 件的冷却方式	(19)
1.5.3 降低噪声的措施	(20)
主要参考文献	(21)

第二章 牵引电机

2.1 直流牵引电动机概况	(22)
2.1.1 直流牵引电动机技术经济指 标	(22)
2.1.2 直流牵引电动机的关键技 术和主要部件	(25)
2.2 交流牵引电动机发展概况	(28)
2.2.1 交流牵引电动机的优越性	(28)
2.2.2 交流牵引电动机主要参数 和技术经济指标	(29)
2.2.3 异步牵引电动机和同步牵 引电动机比较	(30)
2.2.4 异步牵引电动机的特点	(31)
2.3 牵引电机绝缘材料和工艺	(33)
2.3.1 牵引电机绝缘材料、绝缘结 构与绝缘工艺的发展趋势	(33)
2.3.2 牵引电机绝缘材料与绝缘 工艺发展中有关技术	(34)
2.4 新型牵引电动机发展趋势	(38)
2.4.1 他励牵引电动机	(38)
2.4.2 直线牵引电动机	(39)
2.4.3 永磁牵引电动机	(40)
2.4.4 开关磁阻电动机	(41)
2.5 CAD、CAM 在牵引电动机 设计制造中应用	(42)
主要参考文献	(42)

第三章 牵引电器

3.1 几种主要牵引电器发展现状	(43)
------------------	------

.....	(43)
3.1.1 受电器	(43)
3.1.2 断路器	(44)
3.1.3 半导体断路器	(45)
3.2 国外牵引电器制造工艺	(46)
3.2.1 有触点电器典型零件制造工艺	(47)
3.2.2 无触点电器制造工艺	(48)
3.3 牵引电器的发展趋向	(49)
3.3.1 机电一体化	(49)
3.3.2 发展与电子控制技术相适应的接口电器	(49)
3.3.3 提高牵引电器的额定参数	(49)
3.3.4 发展组合电器	(49)
3.3.5 缩小体积、减轻重量	(50)
主要参考文献	(50)
第四章 牵引齿轮的加工、热处理和检测	(51)
4.1 牵引齿轮加工	(51)
4.1.1 滚齿和插齿加工	(51)
4.1.2 磨齿加工	(53)
4.1.3 螺旋锥齿轮加工	(53)
4.1.4 齿轮刀具的改进	(54)
4.2 牵引齿轮的热处理	(55)
4.2.1 主动齿轮的渗碳淬火	(55)
4.2.2 从动齿轮的感应淬火	(56)
4.3 牵引齿轮检测	(57)
4.3.1 电子测量方法	(57)
4.3.2 激光测量方法	(58)
4.3.3 多面体和准直仪测量方法	(59)
4.3.4 齿轮综合检测	(59)
4.4 提高牵引齿轮承载能力和寿命的途径	(60)
4.4.1 齿轮疲劳点蚀产生原因和提高齿面抗点蚀能力的途径	(60)
4.4.2 齿根弯曲疲劳强度的研究和提高齿根弯曲疲劳强度的途径	(61)
4.4.3 改善齿轮装置工作条件和重视润滑技术	(62)
第五章 车体、转向架和焊接工艺	(63)

5.1 车体	(63)
5.1.1 耐候钢车体	(63)
5.1.2 铝合金车体	(63)
5.1.3 不锈钢车体	(64)
5.1.4 复合材料车体	(65)
5.1.5 混合式车体	(66)
5.1.6 各种材料结构车体的比较	(66)
5.2 转向架	(67)
5.2.1 无摇枕转向架	(67)
5.2.2 新型铸钢转向架构架	(67)
5.2.3 新型钢板焊接转向架构架	(66)
5.2.4 铝合金转向架构架	(68)
5.2.5 复合材料转向架构架	(68)
5.2.6 钢铝混合式转向架构架	(68)
5.2.7 钛合金转向架构架	(68)
5.3 焊接工艺	(68)
5.3.1 焊接材料	(68)
5.3.2 焊接施工方法	(70)
5.3.3 焊接设备的发展	(71)
5.3.4 切割技术的发展	(72)
第六章 电传动矿用自卸车	(73)
6.1 电传动矿用自卸车的技术发展回顾	(74)
6.2 国外电传动矿用自卸车发展现状	(74)
6.2.1 整车及其生产厂家	(74)
6.2.2 主要部件	(76)
6.3 电传动矿用自卸车自 80 年代以来的重要发展	(80)
6.3.1 提高可靠性	(80)
6.3.2 广泛采用组合技术,使元件、部件集中化	(81)
6.3.3 研制出更大吨位电传动自卸车	(81)
6.3.4 进一步强化柴油机功率,改善其经济性	(81)
6.3.5 电传动系统采用三次谐波励磁	(82)
6.3.6 广泛采用新技术、新结构	(83)
6.3.7 增设架线辅助供电装置	(84)
6.3.8 发展高寒地区自卸车	(85)

6.3.9	形成适合自卸车的生产工艺	(86)
6.4	电传动矿用自卸车的发展前景	(86)
6.4.1	开发新型柴油机	(86)
6.4.2	采用交—交电传动系统	(87)
6.4.3	推广使用大型构件的设计方法	(87)
6.4.4	进一步采用组合技术	(87)
6.4.5	电子计算机的应用	(88)
6.4.6	整车设计程序化	(88)
6.4.7	开发新型无污染的电传动矿用自卸车	(88)
	主要参考文献	(88)
第七章	城市交通轻轨车	(89)
7.1	轻轨交通的特点和等级划分	(89)
7.1.1	轻轨交通的特点	(89)
7.1.2	轻轨交通的等级划分	(90)
7.2	国外轻轨交通和轻轨车生产概况	(90)
7.2.1	国外轻轨交通系统概况	(90)
7.2.2	国外轻轨车的主要生产厂家	(92)
7.3	国外轻轨车技术水平	(93)
7.3.1	轻轨车的车型	(94)
7.3.2	轻轨车主要技术指标和技术参数	(94)
7.4	轻轨车主要部件技术水平	(94)
7.4.1	车体	(94)
7.4.2	转向架	(98)
7.4.3	制动装置	(100)
7.4.4	电控系统	(100)
7.4.5	微机在轻轨车上的应用	(100)
7.4.6	自动控制	(101)
7.5	轻轨车的发展趋向	(101)
7.5.1	发展低地板、高性能的轻轨车	(101)
7.5.2	发展高载客量的宽车体轻轨车	(101)
7.5.3	发展用自关断电力电子器件和微机的交流传动变频	

	调速系统	(102)
7.5.4	千方百计节约电能、减轻维护量	(102)
7.5.5	进一步改善乘客舒适度	(102)
	主要参考文献	(102)
第八章	蓄电池工业车辆	(103)
8.1	国外蓄电池工业车辆概况	(103)
8.1.1	国外蓄电池工业车辆厂商概况	(103)
8.1.2	蓄电池工业车辆优越性	(104)
8.1.3	蓄电池工业车辆电压等级	(104)
8.1.4	国外蓄电池工业车辆的特点	(105)
8.2	蓄电池工业车辆的性能参数	(105)
8.2.1	三轮坐控叉车	(107)
8.2.2	四轮坐控叉车	(108)
8.2.3	电动牵引车	(112)
8.2.4	电动搬运车	(113)
8.3	国外蓄电池工业车辆主要部件的技术发展水平	(113)
8.3.1	车轮与轮胎	(113)
8.3.2	行走传动系统	(115)
8.3.3	直流电动机	(115)
8.3.4	斩波器	(118)
8.3.5	蓄电池	(119)
	主要参考文献	(119)
第九章	电动汽车	(120)
9.1	开发电动汽车的必要性	(120)
9.2	电动汽车用蓄电池特性和现有水平	(120)
9.2.1	铅酸电池	(122)
9.2.2	镉镍电池	(122)
9.2.3	铁镍电池	(122)
9.2.4	锌镍电池	(122)
9.2.5	镍氢电池	(122)
9.2.6	锌溴电池	(122)
9.2.7	钠硫电池	(123)
9.3	电动汽车的牵引电动机和控制技术	(123)
9.3.1	直流电动机	(123)

9.3.2	交流感应电动机	(124)	10.3.2	日本	(143)
9.3.3	永磁电动机	(124)	10.3.3	英国	(148)
9.3.4	开关磁阻电动机(SRM)	(125)	10.3.4	前苏联	(150)
9.3.5	电动汽车的控制技术 ..	(125)	10.3.5	美国	(151)
9.3.6	快速充电装置	(126)	10.3.6	韩国	(152)
9.4	标志当代电动汽车先进水 平的典型实例	(126)	10.3.7	加拿大	(152)
9.4.1	ABB 公司采用钠硫电池和 直流他励电动机的电动汽车	(126)	10.3.8	其他国家	(153)
9.4.2	美国福特汽车公司采用钠 硫电池和永磁同步电动机的 ETX—Ⅱ型电动汽车 ..	(128)	10.4	磁浮列车的关键技术与相 关技术	(153)
9.4.3	日本日产(Nissan)汽车公 司采用镉镍电池具有快速 充电系统的 FEV 电动汽车	(129)	10.4.1	超导磁体(SCM)技术	(153)
9.4.4	日本东京电力公司组织研 制的 IZA 型高性能电动汽车	(130)	10.4.2	多级计算机、多变量闭环 控制系统	(154)
9.5	当前电动汽车商品化面临 的主要课题及其对策。...	(131)	10.4.3	功率型牵引电机的设计	(156)
9.5.1	电动汽车一次充电续驶里 程短及其对策	(131)	10.4.4	多功能地面线圈	(157)
9.5.2	加速性能差和最高车速低 及其对策	(132)	10.4.5	变电所与变流站	(157)
9.5.3	车价过高和降价措施 ..	(132)	10.4.6	磁浮技术的远景应用	(158)
9.5.4	尚未建立服务网点和相应 配套措施	(133)	10.5	磁浮列车的综合评价及一 般对策	(159)
9.6	电动汽车发展前景展望	(133)	10.5.1	综合评价	(159)
	主要参考文献	(134)	10.5.2	2000 年的发展预测与对策	(159)
第十章	磁浮列车	(135)		主要参考文献	(160)
10.1	磁浮列车的系统组成	(135)	附录	缩略词和磁浮技术常用术 语中西文对照表	(162)
10.1.1	悬浮制式	(136)			
10.1.2	磁浮列车的牵引动力—— 直线牵引电动机	(137)			
10.2	磁浮列车的主要性能与发 展水平	(140)			
10.2.1	主要性能特征	(140)			
10.2.2	国外应用发展水平	(142)			
10.3	各国磁浮列车研制概况	(143)			
10.3.1	德国	(143)			

第一章 自关断电力电子器件 在电力牵引中的应用

众所周知,构成电力电子技术基础是电力电子器件(又称电力半导体器件)。几十年来,晶闸管(目前水平为 3500A/6500V、1000A/12000V)及其派生器件成功地应用于电力牵引领域中,大大节约了电能、改善了各种车辆牵引性能和技术水平。但是晶闸管及其派生器件可用正门极脉冲电流导通,却不能用负门极脉冲电流来关断,为此在车辆主电路中必须设置相应的换流回路来强制关断,这就导致晶闸管变流器结构复杂、体积庞大,也带来了可靠性较差和成本较高等弊病。

80 年代以来,由于微电子精细加工技术和高电压大电流的电力电子技术相结合,产生了新一代全控型高频化的自关断电力电子器件。它们具有集成化、高频化、全控化和多功能化的特点,既可由门极实现导通,又可自行关断,省去了原来的强制换流回路,带来了性能好、效率高、成本低、维护少、体积小和重量轻等一系列优点,它与微机一起在车辆上应用,将电力牵引车辆推进到一个新的发展阶段。

因此,国外发达国家都在电力牵引车辆上大力推广应用自关断电力电子器件,尤其是目前处于领先水平的日本和德国,在地铁和轻轨车上已取得引人注目的成效。现就所掌握文献加以综合评述,并简述了牵引电传动相关的几项关键技术发展趋势。

1.1 适用于电力牵引的自关断电力电子器件的现有水平

1.1.1 可关断晶闸管(GTO)

GTO 是可用正脉冲电流导通和负脉冲电流关断的器件,目前已达到 3000A/6000V 和 1000A/9000V 的水平。如此高的电压和大的电流,可直接用于直流架线电压 1500V 的地铁车和轻轨车等大功率车辆上,而无需将 GTO 串并联,这是其它自关断电力电子器件尚达不到的。但由于 GTO 的关断增益很差(一般为 4 或 5),关断损耗又大,还存在二次击穿问题,需要大功率吸收电路,且对门极触发和关断电路以及吸收电路的要求比较苛刻,GTO 的调制频率一般限于 1~2kHz。尽管 GTO 存在上列缺点,但它具有开关功率大和无需设置强制换流环节的优点,使 GTO 正在取代晶闸管的应用领域。目前广泛用于交流电机驱动系统、UPS 等,在电力牵引领域,主要用于地铁、轻轨车等中大功率传动装置中。

1.1.2 大功率晶体管(GTR)和功率场效应晶体管(Power MOSFET)

GTR 是持续电流受控的双极型自关断器件,它具有控制方便、开关时间短和高频特性好等优点。目前生产的 GTR 已基本实现模块化,开关频率可达 5kHz,容量已达 600A/1200V 和 450A/1300V 的水平。

GTR 的局限性是电压难以超过 1500V,在高电压大功率应用场合,需采用二级或三级 GTR 模块;二次击穿虽有改进,但仍然是限制 GTR 应用的一个重要因素。所以在电力牵引领域,大都应用于由蓄电池供电的低压中小容量的车辆电传动系统,或是车用辅助电源装置中。

MOSFET 是一种电压控制型器件,具有输入阻抗高、开关速度快和开关损耗低等特点。它和 GTR 的性能比较列于表 1—1。

表 1—1 功率 MOSFET 与 GTR 的性能比较

参 数	GTR	功率 MOSFET
输入阻抗(Ω)	$10^3 \sim 10^5$	$10^9 \sim 10^{11}$
电流增益	100~1000	$10^5 \sim 10^9$
击穿电压(V)	2000	1500
电流水平(A)	750	150
导通时间(ns)	50~500	1
关断时间(ns)	500~2000	1
导通电阻	低	较低

从表 1—1 可见,功率 MOSFET 开关速度比 GTR 快得多,工作频率可达 500kHz,且具有良好的电流调节能力,短时过载电流可达到额定值的四倍,不易发生局部热点和二次击穿,因而几乎无需吸收电路;多管并联时也易于均流,驱动电路也较简单,因此近年来发展很快。在 1985~1990 年期间,功率 MOSFET 产量每年递增 32.6%,它占 GTR 市场的份额由 15%上升到 32%。目前功率 MOSFET 的水平为 200A/1000V。在电力牵引应用中尚嫌不足,故一般只能用于小功率车辆的电传动系统和车用辅助电源装置中。

1.1.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT)

IGBT 是一种兼有 MOSFET 高输入阻抗、高速特性和 GTR 低电压降优点的混合型器件。它的关断时间和开关损耗小,工作频率一般为 10~30kHz,甚至可高达 50kHz,开关损耗相当于 GTR 的 1/10。电流密度大,因而其管芯尺寸约为同等容量 MOSFET 的 30%。它的安全工作区宽,没有 GTR 器件固有的二次击穿问题,在 IGBT 的性能处在稳定的安全工作区、无二次击穿及其快速性,当与它匹配的二极管(如肖特基二极管)具有快恢复和软恢复特性时,即可制成不用吸收电路的 IGBT 变流器。

IGBT 现已达到 600A/1200V、800A/1000V 的水平,法国阿尔斯通公司做出了 1500A/1600V 的 IGBT 并基本实现模块化。现正向具有功率控制电路的接口电路,过电流、过电压和过热保护电路,逆变器上下支路信号分配电路和可防止上下支路短路的第三代智能 IGBT 模块方向发展。

IGBT 已被德国西门子公司应用于 12t 矿用蓄电池机车中,德国 AEG 和日本几家公司还将 IGBT 用于中等容量的轻轨车,在现代化电动汽车中,也正在愈来愈得到广泛应用。

1.1.4 MOS 控制晶闸管(MCT)

MCT 是将 MOSFET 的高阻抗、低驱动功率、快开关速度的特性与晶闸管的高电压大电流特性结合在一起,成为大功率、高电压、快速的电压控制型器件。它实质上是一个 MOS 门极控制的晶闸管,具有二个 MOS 门极:一个 MOS 门极作晶闸管的开通门极,另一个 MOS 门极作晶闸管的关断门极。它的开关频率可在 20kHz 以上,与 IGBT 相当,而通态压降却只有 IGBT 的 1/2 左右;此外,由于 MCT 相当于最密集交叉指状结构和密集短路点的晶闸管,所以其 di/dt 可达 2000A/ μ s, dV/dt 可达 2000V/ μ s,而且工作结温可达 150~200℃。由于 MCT 不存

在二次击穿效应,因此可制成无吸收电路的变流器。据报导,采用 MCT 制成 PWM 逆变器,其功率损耗仅为 GTR 或 IGBT 的 56%。

目前已有 100A/1000V 的 MCT 产品,已研制出 3000V 的 MCT。美国通用电气(GE)公司已将 MCT 逆变器应用于 ETX—Ⅰ型电动汽车上,比原用 GTR 逆变器体积缩小 55%,重量减轻 28%,从而可使该型电动汽车的电传动系统效率提高 2~3%。

1.1.5 功率集成电路(PIC)

所谓功率集成电路是功率器件与驱动电路、控制电路以及保护电路的集成,一般将集成电路的功率大于 1W 就称为 PIC。目前 PIC 分成两大类:一类是高压集成电路,这是横向高耐压器件与控制电路的单片集成,现已达到 600mA/500V 和 20A/80V 的水平;另一类是智能功率集成电路,它是纵向功率集成器件与控制电路、保护电路以及传感器的单片集成,目前水平为 13A/110V 和 0.5A/550V。

1.1.6 智能模块

智能模块是将电力半导体器件与具有信息处理功能、自我保护功能等电路集成或组装在导热的绝缘衬底上并封装在一个外壳内,可以说是电力电子技术和微电子技术密切结合的产物。现已有 600V/30A、50A 和 75A 的产品。

1.2 自关断电力电子器件在车用辅助电源装置中的应用

1.2.1 对车用辅助电源装置的要求

车用辅助电源装置除了供给车辆控制、照明、蓄电池充电外,现代化的车辆还供给空调装置的电源。因此要求它具有下列功能:

(1)稳定电压的功能。由于接触网或由第三轨供电的车辆电源电压可在额定电压 -33% ~ 20% 范围内波动,甚至在“跳弓”瞬时断电情况下,仍应能保持辅助电源电压稳定。

(2)功率变换功能。将高压直流电或单相交流电变换成车用所需的低压单相或三相交流电。

(3)电路绝缘功能。即辅助电源装置应在低压电路和高压电路之间实现电气绝缘。

常用的辅助电源装置是采用电动发电机组、晶闸管逆变器和 GTO 逆变器,它们的性能比较列于表 1—2。

表 1—2 车用辅助电源装置的性能比较

项 目	电动发电机组	晶闸管逆变器	GTO 逆变器
变换效率	70~80%	75~85%	90~95%
装置总重	100%	90~110%	60~80%
噪 声	76~85dB	72~80dB	65~72dB
维 护	每 1~2 个月检修一次电刷; 每 1~2 年需更换电刷; 每 1.5~2 年给轴承加一次油; 每 3~4 年需更换轴承	每 2~6 月清扫一次滤尘网; 每 1~2 年内部清扫一次; 每 6~8 年更换风机轴承。	每 2~6 年清扫一次。

从表 1—2 可知,GTO 逆变器要比电动发电机组和晶闸管逆变器的各项性能都优越。

1.2.2 用自关断器件的辅助电源装置电路方式比较

为满足上列三种功能的车用辅助电源装置,常用图 1—1 所示电路方式。

(1) 直接三相 PWM 逆变器式(图 1—1a)

此种电路方式系将逆变器经滤波器直接连到直流 1500V 架线上,因而需用 4500V 的 GTO,逆变器输出电压要考虑到架线电压的最低值,且输出电流大,GTO 的导通比变化也大,恶化了续流二极管的电流利用率。另外 GTO 的开关损耗和吸收回路的损耗过大,故此电路很少采用。

(2) 直接 12 相 PWM 逆变器式(图 1—1b)

此电路接线方式的特点是用一个串联连接的电容器,将直流电源分压再分别接到三相逆变器的直流输入端,从而 GTO 电压可降低一半。每三相逆变器输出电压用二个变压器来降压,二次侧是用多重接线方式,这样可除去 5 次、7 次谐波,从而得到畸变率低的输出波形。

但此种电路方式需要二个变压器,体积庞大,同样也存在直接三相 PWM 逆变器式的缺点。

(3) GTO 二重斩波器和 12 相 GTR 逆变器组合式(图 1—1c)

此电路由于先由 GTO 斩波器变换成合适的直流电压,因而可用 GTR 来构成 12 相逆变器,且比 PWM 方式开关损耗少,但同样需用二组逆变器和变压器,体积和重量问题仍未得到解决。

1.2.3 升降压限制式车用辅助电源装置

升降压限制式电路原理图如图 1—2 所示。此电路有下列特点:

(1)通过控制 GT_1 和 GT_2 的导通比,可得到最佳电压值,且使输入电流脉动频率提高,而使滤波器小形化。

(2)采用脉相调制(PPM),可使输出电压中消除 5 次、7 次谐波。GTO 利用率高,续流二极管容量小。

(3)电路构成简单。三相逆变器和输出变压器可装在同一箱内,简化了箱与箱之间的连线。

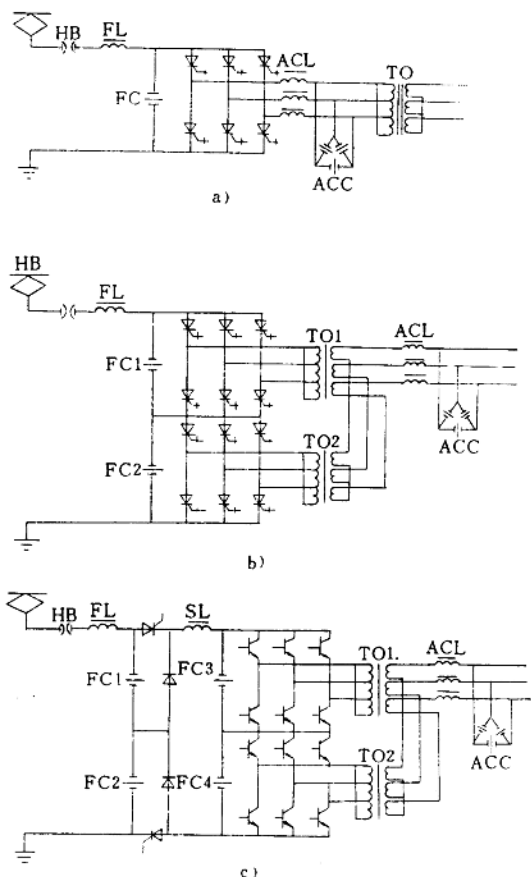


图 1—1 车用辅助电源装置的常用电路

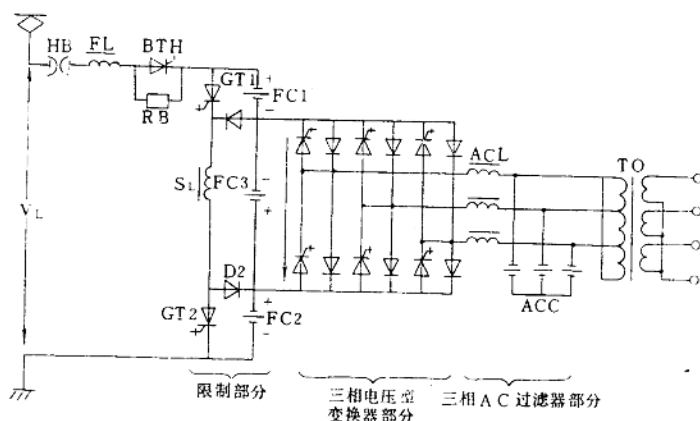


图 1—2 升降压限制式电路原理图

日本东洋电机公司采用此电路方式制成 130kVA 辅助电源装置，并由 16 位微机进行控制、保护和故障诊断，不仅提高了辅助电源装置的性能和可靠性，而且体积和重量减轻 40%，效率高达 90% 以上，噪声在 70dB(A) 以下，其主要参数见表 1—3 所列。

表 1—3 辅助电源装置主要参数对比

对比项目		主要参数	
方 式	主电路方式	GTO 二重斩波器和 12 相 GTR 逆变器组合	升降压限制式斩波器和三相 GTO 逆变器组合
	控制方式	斩波器稳压控制	由升降压限制式斩波器进行直流电压控制
	冷却方式	自然冷却	自然冷却
输入	额定电压 电压波动范围	直流 1500V 1000~1800V	直流 1500V 900~1800V
输出	额定容量 额定电压 电压精度 频率 电压畸变率 负载功率因数 噪声 效率	40~170kVA 200V, 400V(三相交流) +5~-10% 60Hz±1% 5%以下 85% 66.5dB(A) 91%~93%	130kVA 200V(三相交流) +5~-5% 60Hz±1% 8%以下 90% 70dB(A)以下 90%以上
制造厂家		三菱电机公司	东洋电机公司

1.2.4 IGBT 辅助电源装置

图 1—3 所示为采用 IGBT 模块的辅助电源装置电路构成，输入电压 750V，输出容量 170kVA，输出电压为三相 440V。

IGBT 辅助电源装置最大特点是体积小、重量轻、效率高，图 1—4 即为 IGBT 逆变器的效

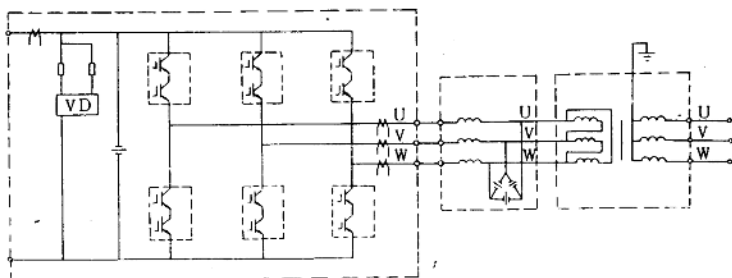


图 1-3 IGBT 辅助电源装置

率特性曲线,显然要比其它自关断电力电子器件组成的辅助电源装置效率高 4% 左右。

东芝电气公司已用自制 1200V、500A 的 IGBT 模块,开发出 100kVA、150kVA 和 210kVA 三个系列的车用辅助电源装置。它与 GTO 辅助电源装置相比,占地面积减少 36%,重量减轻 22%,体积缩小 41%;而且效率高达 92%,在满负载时噪声只有 68dB(A)。该公司还用数字信号处理器(DSP)对 IGBT 车用辅助电源装置实现了高性能控制,运行可靠性高,在 7 年内可以无需维护,并具有自诊断功能。

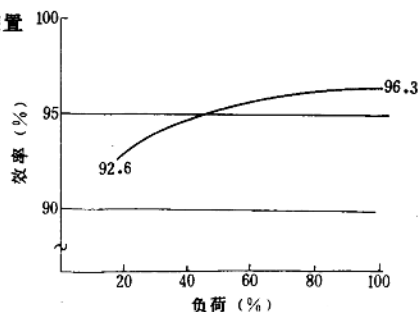


图 1-4 IGBT 辅助电源装置
逆变器的效率特性曲线

1.3 自关断电力电子器件在直流传动车辆上的应用

1.3.1 GTO 斩波器的优越性

目前,在世界各国城市地铁或轻轨车辆上,基本上仍以直流牵引电动机为动力。这种直流电传动车辆,通常是用晶闸管斩波器把架线或第三轨上的直流额定电压转换为可调电压来实现调速。GTO 斩波器主要用途就是替代这种强制换流环节的晶闸管斩波器。表 1-4 列出了这二种斩波器比较情况。

表 1-4 晶闸管斩波器和 GTO 斩波器比较

项 目	晶闸管斩波器	GTO 斩波器
体积(m ³)	8.46	5.8
重量(kg)	3540	2370
效率(%)	92	96
噪声(dB)	80	71

从表 1-4 所列可概略了解采用 GTO 的一些优点,下面较详细说明 GTO 斩波器的优越性。

第一个优点是成本较低(一般可低 30%)。虽然 GTO 的门极触发电路比晶闸管的贵,但晶

闸管斩波器的强制换流环节至少应有辅助晶闸管、二极管、换流电容器和电抗器来构成,这些大功率器件的价格大大高于 GTO 门极触发电路附加的低压器件。除了成本外,如表 1—4 所列,同样容量的斩波器体积和重量也减少了。

GTO 斩波器效率也比晶闸管斩波器效率高 4%。一般 1500V、1000kW 晶闸管斩波器在换流电路中的功率损耗约 2kW, GTO 斩波器不存在这些损耗,而 GTO 本身、吸收电路或均压电路中的功率也不过数百瓦而已。

第三个优点是有优良的控制性能。因为它没有复位换流电路的时延, GTO 门极驱动延时很短,从而具有较宽的可控范围; GTO 斩波器的频率也相应增加,最高频率可达 1000~2000Hz,这既可取消平滑电抗器,又可减少滤波器谐波电流,使噪声降低 13%。

最后一个优点是 GTO 的关断能力与架线电压无关,因而 GTO 斩波器换流能力不受架线电压波动的影响,这就大大提高了可靠性。

1.3.2 GTO 斩波器在地铁和轻轨车上应用概况

80 年代以来,国外各种直流电传车辆正由 GTO 斩波器来取代晶闸管斩波器。由于用户对体积小、重量轻、维护简便和价格低廉的要求一直非常强烈,因此日本地铁上几乎全部采用电枢斩波器调速车。为扩大调速范围,一般均采用具有自动磁场削弱的斩波器,若需再生制动,则要采用高频四象限斩波器(参见图 1—5)。例如日本东京帝都高速交通营团(TRTA)银座线,是由日立、东芝和三菱电机公司分别提供的地铁车,均采用 120kW 直流他励牵引电动机,且主电路构成也大致相同,都

由二相一重电枢斩波器和一相励磁斩波器组成。电枢斩波器采用 GTO,工作频率为 1000~1200Hz,合成频率高达 2000~2400Hz。磁场斩波器可连续调节励磁率,以改善车辆的粘着性能和再生性能;磁场斩波器的频率也比以往所选用的频率高一倍以上,这样使滤波电容器的电容和滤波电抗器的电感减少一半,相应的重量减轻 30%和 55%, GTO 磁场斩波器的重量减轻约 25%,噪声降低 10dB 左右。

表 1—5 所列为日本的东芝、日立和三菱电机这三家公司为东京银座线地铁车所用的斩波器主要参数比较情况。图 1—6 所示为日立公司的 GTO 斩波器主电路。

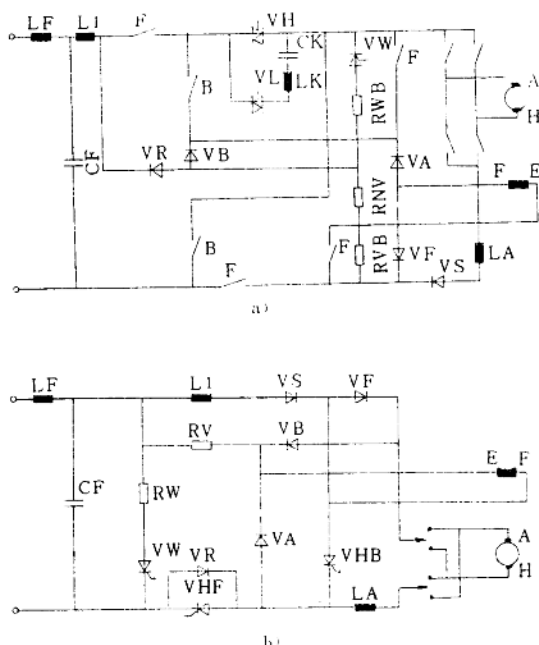


图 1—5 具有自动磁场削弱的斩波器主电路
a. 逆导晶闸管斩波器 b. GTO 斩波器

表 1—5 GTO 斩波器主要参数比较

制造公司		东芝公司	日立公司	三菱电机公司	
项 目					
电源额定电压(V)		DC600	DC600/750	DC750	DC1500
牵引电动机功率(kW)		120	120	120	160
控制功率(kW)		480	480	480	640
控制频率(Hz)		1000(合成 2000)	250~500~1000	300~600~1200	200~400~600
GTO	电枢斩波器	2500V 800A×2 ^①	2500V 2400A	2500V 1800A	4500V 2000A
	磁场斩波器	2500V 600A	2500V 1000A	2500V 600A	4500V 600A

注:①系采用二个 SG800EX21 型 GTO 并联。

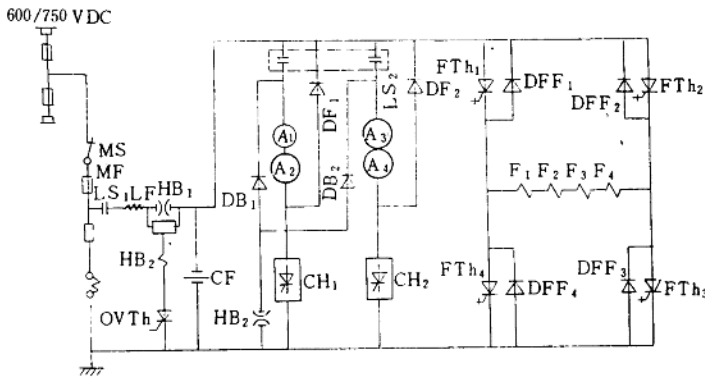


图 1—6 日立公司的 GTO 斩波器主电路

A₁、A₂、A₃、A₄—120kW 牵引电动机电枢 CF—滤波电容器 CH₁、CH₂—GTO 斩波器 DB₁、DB₂—制动二极管
DF₁、DF₂—续流二极管 DFF₁、DFF₂、DFF₃、DFF₄—续流二极管 F₁、F₂、F₃、F₄—励磁绕组 MS—主开关
FTh₁、FTh₂、FTh₃、FTh₄—励磁斩波器 HB₁、HB₂—高速断路器、LF—滤波电抗器 LS₁、LS₂—线路开关 MF—
主熔断器 OVTh—过电压保护晶闸管

英国马可尼公司 1987 年也成功地将 GTO 斩波器应用于地铁车和轻轨车上。英国通用电气公司(GEC)生产的香港地铁车和轻轨车均采用 GTO 斩波器,先后于 1987 年和 1988 年 12 月,成功地投入运行。GEC 认为采用 GTO 斩波器和用 16 位微机实时控制,要比采用晶闸管斩波器成本降低 30%,既提高了车辆性能和可靠性,又减少了能耗。因此,该公司已将微机控制的 GTO 斩波器作为直流牵引电传动系统设计的工业标准。

1. 3. 3 GTR 和 MOSFET 斩波器在蓄电池车辆上应用概况

由蓄电池供电的各种电动车辆,诸如电动叉车,蓄电池机车和电动汽车,一般供电电压较低,功率也不大,因而现有的 GTR 不需串并联就可满足要求。例如美国 Chrysler 公司和 GE 公司研究开发的 ETV—1 型电动汽车,所采用的四极直流他励电动机就是由 GTR 构成的电

枢斩波器和磁场斩波器来调速。车速从零到 48km/h 时使用电枢斩波器控制,控制其导通比来调节电机的电枢电压,此时调压范围为 0~108V。当车速超过 48km/h 后,调节磁场斩波器使磁场电流减少,而电枢则通过旁路接触器来承受蓄电池的全电压。

GE 公司为 EV—T6 型电动叉车提供的 MOSFET 斩波器,其主要技术参数如表 1—6 所列。

表 1—6 EV—T6 电动叉车 MOSFET 斩波器主要参数

蓄电池电压	直流 24、36、48V
电动机电流极限(选择、可调)	100~450A;100~350A
反接制动电流(选择、可调)	200~450A;200~450A
一小时额定值	220A
工作频率	5kHz
环境温度	-40℃~+50℃
体积(H×L×W)	96×254×161mm

EV—T6 型电动叉车的 MOSFET 斩波器是由三个功率 MOSFET 并联构成。当接通蓄电池后,就对电容器进行充电,约经 2s 后即可充满电,使电容器电压达到蓄电池电压。当钥匙和座位开关闭合时,控制器自动检查各个电气开关上的电压,均符合技术要求后,才允许线路接触器闭合和控制器开始正常工作。然后闭合起动开关和方向开关(向前或向后),就使相应的方向接触器闭合而接通主电路,再由逻辑电路向 MOSFET 提供栅极控制电压使之导通,电动机运转;当 MOSFET 的栅极控制电压消失时就自动关断。

EV—T6 型电动叉车采用频率调制和脉冲宽度调制方式,并附有故障诊断功能的便携式检测器,能迅速检查出故障予以排除。

1.4 自关断电力电子器件在交流传动车辆上的应用

1.4.1 车辆采用交流传动的优越性

在车辆上用 VVVF 逆变器来控制交流牵引电动机的技术,通称交流电传动技术,其优点可由图 1—7 概略描述。

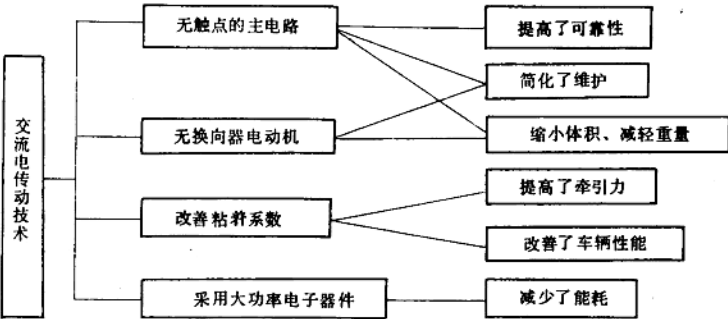


图 1—7 交流电传动技术优点框图

(1)良好的可靠性和维修性

交流牵引电动机没有直流牵引电动机的换向器和电刷,结构简单,因而可靠性较高,便于维修,这是众所公认的。虽然交流变压变频装置要比直流斩波调压装置技术复杂些,但由于自关断电力电子器件和微机的应用,尤其实现微机监控、保护和故障诊断,可进一步提高可靠性和改善维修性。如德国 BR120 型机车无故障运行超过 40 万 km。丹麦铁道机车两次大修间需检修 64 次,而三相交流电传动车辆只有 32 次。

(2)优异的牵引性能

车辆采用交流电传动可改善粘着利用性能,或者在相同粘重时,使牵引力提高 50%。例如德制 BR120 型机车在干燥轨面的粘着系数大于 0.40,起动牵引力达 340kN,这台四轴机车在持续速度下有足够的加速能力,它的牵引性能可与六轴的直流电传动机车相媲美;而且只要一型型号机车作为通用型机车,可使机车总数减少 20%。

(3)改善功率因数,节省用电

对于交流电机车来说,采用交流电传动并由 GTO 实现高频控制,既可减小高次谐波电流,又可使功率因数接近于 1,且不需加装任何附加装置就能实施再生制动直至制停,因而大大节省电能,使电网利用率提高 30%。

(4)缩小体积、减轻重量

交流牵引电动机要比直流牵引电动机转速高,在同样功率下,体积小、重量轻,既易于在转向架内布置,又可减轻簧下重量,提高车辆动力性能。虽然交流电传动车辆的变频器比直流电传动车辆的斩波器所需器件多,控制也复杂些,若实行自关断器件模块化和微机控制,整个交流电传动装置仍然要比直流电传动装置体积小、重量轻。

(5)显著的经济效益

交流电传动技术在车辆实际运行中表明具有显著经济效益。例如德国的鲁尔煤矿公司向原 BBC 公司订购的六辆 E1200 型交流电传动工矿电机车,起动牵引力 355kN,年运量 $3 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{km}$;而同样粘重的 EA1000 型直流电传动机车起动牵引力 280kN,年运量只有 $2 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{km}$,且 E1200 型机车每吨公里的运管费可减少 25%左右。在运行可靠性方面,E1200 型机车投入运行 18 个月中,每辆车平均故障率为 0.4 次,而 EA1000 型车则达 0.9 次。E1200 型车的每吨公里的轮缘磨损量仅为 EA1000 型车的 54%。由于交流电传动车辆施行再生制动可直到列车制停为止,使制动闸瓦损耗量也较低。例如丹麦铁路原来每年需要 8.5 万块闸瓦,而在 30 辆交流电传动机车投入使用之后,闸瓦减到 3 万块,仅此一项每年可节省 300 万丹麦克朗。

1.4.2 交流电传动的地铁和轻轨车发展现状

虽然车辆采用交流电传动比直流电传动具有如此多优越性,但由于交流牵引电动机的调速,不仅需要改变供电电压,而且还需要改变频率,即需要通过变压变频装置来实现。因此能否制成实用的变压变频装置(即 VVVF 逆变器),是车辆实现交流电传动的关键。

在 70 年代,交流电传动车辆是采用普通晶闸管制成的 VVVF 逆变器,由于使用器件多,控制线路复杂,体积和重量都较大,因而它的使用仍受到限制。到了 80 年代,以高电压大电流 GTO 为代表的自关断电力电子器件的涌现和微机的普遍应用,才使变压变频技术取得突破性进展。因此,到 80 年代后期交流电传动车辆,尤其是在地铁和轻轨车辆上得到广泛采用。

表 1—7 列出了日本 1991 年 11 月统计的采用 VVVF 逆变器控制的交流电传动车辆的主要性能参数。