

# Comparison of Chinese High-Speed Train Traction Drive System

Yong-Sam Jong<sup>1</sup>, Xiangfei Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pyongyang Railway University, Pyongyang, North Korea

<sup>2</sup>Beijing Jiaotong University, Beijing

Email: [yongsam@163.com](mailto:yongsam@163.com)

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2014; revised: Apr. 10<sup>th</sup>, 2014; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The paper mainly introduces Chinese high-speed trains and analyzes the characteristics of the main circuit and the control block diagram of CRH1, CRH2, CRH3, CRH5, CRH380A and CRH380B. At the same time, the detailed description and analysis of the structure of the pulse converter and the inverter of CRH2 are introduced. The paper also compares the advantages and disadvantages of the tri-level pulse rectifier and the carrier phase shift multi-pulse. Through considering the control strategy of CRH2's and CRH5's DC link and the inverter control method in detail and explaining the differences in different aspects, the conclusion is drawn. CRH2, CRH5 and CRH380A adjust the inverter frequency through the inverter control software, so that the product of voltage and time of the inverter's output voltage can be equal in the positive and negative cycle to eliminate the influence of the second harmonic voltage. While the CRH3 and CRH380B set the second harmonic absorption circuit, the LC series resonant circuit is used to eliminate the second harmonic. All these motors use the vector control. Indirect vector control is mainly used.

## Keywords

High-Speed Train, Traction Drive System, Main Circuit, Control System

---

# 中国高速列车牵引传动系统比较分析

郑英三<sup>1</sup>, 李翔飞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>平壤铁道大学, 平壤, 朝鲜

<sup>2</sup>北京交通大学, 北京

Email: [yongsam@163.com](mailto:yongsam@163.com)

收稿日期: 2014年3月6日; 修回日期: 2014年4月10日; 录用日期: 2014年4月20日

## 摘要

本文主要介绍中国高速列车的主要车型, 并且重点从技术层面上对比分析了CRH1、CRH2、CRH3、CRH5、CRH380A和CRH380B型动车组的牵引传动系统的主回路及其控制的特点, 同时就CRH2型动车组的脉冲整流器和逆变器的主体结构进行了详细的介绍和分析, 分析了3电平脉冲整流器的优缺点, 同时与具有典型特点的CRH5型车的载波移相多重化的控制特点进行了分析和对比。就CRH2和CRH5型车的中间直流环节和逆变器的控制策略、控制方法进行了详细的介绍和解释, 对比其各方面特性的差异, 从而得出结论。对于中间直流环节的二次脉动的处理方面, CRH2、CRH5和CRH380A通过逆变器的软件控制, 调节逆变器频率, 使逆变器输出电压在正负周期的电压与时间乘积趋于相等, 来消除二次谐波电压的影响, 而CRH3和CRH380B设置了二次谐波吸收回路, 通过LC串联谐振电路来消除二次谐波。各车型都采用异步电机的矢量控制, 以间接矢量控制为主。

## 关键词

高速列车, 牵引传动系统, 主回路, 控制系统

## 1. 引言

高速铁路是指通过改造原有线路, 使营运速率达到每小时 200 公里以上。或者专门修建新的“高速新线”, 使营运速率达到每小时 250 公里以上的铁路系统。

与发达国家相比, 中国高铁的规划和建设起步较晚, 但是发展非常迅速。2003 年 10 月 12 日, 长春开往北京的 T6 第一条高速客运铁路线——“秦沈客运专线”正式开通, 也标志着中国从此迈入了高铁时代。2004 年, 中国通过引进国外高速铁路先进技术, 立足国内, 自主创新, 成功研究出 CRH 型“和谐号”系列动车组[1]。

### 1.1. 前期探索阶段

在多年的电力机车研制经验基础上, 中国开始了电动车组及高速列车的探索。中国自行设计制造的首列电力动车组是由长春客车厂、株洲电力机车研究所和铁道科学研究院, 根据铁道部科学技术发展规划, 于 1978 年开始研究设计, 1988 年完成试制的 KDZ1 型电力动车组。该动车组为 2 动 + 2 拖 4 节编组, 总功率为 1200 kW, 采用经济八段桥、相控交 2 直传动, 最高速度是 140 km/h。4 节车均设硬座, 座席呈 2 + 3 布置。全列总定员是 382 人, 其中单节动车定员 88 人, 单节拖车定员 103 人。KDZ1 型电力动车组于 1989 年在北京环形试验线上进行动态调试和各种试验, 最高试验速度达到 142.5 km/h, 各项指标满足设计要求。虽未能投入正式运用, 但是它为后来中国电力动车组的发展积累了经验[2]。

不仅如此, 中国还自行设计制造了“中华之星”高速列车, 而其以每小时 250 公里的试验速度更是迈出了中国高铁建设的重要一步, 揭开了中国高铁发展的序幕。

### 1.2. 快速发展阶段

2004 年, 中国通过引进国外高速铁路先进技术, 立足国内, 自主创新, 成功研究出 CRH 型“和谐

号”系列动车组。其中，CRH1 型动车组由青岛四方—庞巴迪铁路运输设备有限公司(BST)生产；CRH2 型、CRH380A 型动车组由中国南车集团四方机车车辆股份有限公司生产；CRH3 型动车组由中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司生产；CRH5 型动车组由中国北车集团长春轨道客车股份有限公司生产；CRH380B 型动车组由中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司和长春轨道客车股份有限公司生产。各型号动车组主要技术参数如表 1 所示[3]。

### 1.2.1. CRH1 动车组

CRH1 型动车组由青岛四方—庞巴迪—鲍尔铁路运输设备有限公司制造，拥有快速、舒适、可靠特点的同时，又满足了中国铁路客运量比较大的需求。全车设一等车、二等车、餐车等，配备有残疾卫生间，定员 668 人。CRH1 型动车组是动力分散式列车，具有起动加速度较快，制动较快的特点。在中国现行线路中，很多客运线路上都可以看到 CRH1 型动车组的身影，比如在广深铁路、沪昆铁路、达成铁路等。

### 1.2.2. CRH2 动车组

CRH2 型电力动车组，由中国南车青岛四方机车车辆股份有限公司以及日本川崎重工共同研制的动力分散式动车组。CRH2 型动车组编组形式为 8 辆编组，动力配置为 4M + 4T，即 T-M2-M1-T2-T1k-M2-M1s-T，其中相邻的两辆动车为 1 个基本动力单元。每个动力单元具有独立的牵引传动系统。CRH2 型动车组采用交流传动系统，主要由受电弓(包括高压电器设备)、牵引变压器、四象限变流器、中间环节、牵引逆变器、牵引电机、齿轮传动系统等组成。动车组受电弓从接触网获得 AC25000 V/50 Hz 电源，为了满足动车组牵引特性的要求，牵引电机需要电压频率均可调节的三相交流电源。

### 1.2.3. CRH3 动车组

CRH3 型电力动车组，由中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司和德国西门子公司联合生产。

CRH3 动车组为 4 动 4 拖 8 辆编组，采用电力牵引交流传动方式，由 2 个牵引单元组成。动车组具有良好的气动外形，其载客速度为 350 KM\H，最高试验速度为 404 KM\H。两端为司机室，正常运行时由前端司机室操纵。两列动车组可以联挂运行，自动解编。CRH3 动车组设置一等座车一辆、二等座车 6 辆和一辆带厨房的二等座车。一等车厢座席采取 2 + 2 布置，二等车车厢座席采取 2 + 3 布置，除带厨房

Table 1. The parameters of the high-speed train of China  
表1. 中国主型动车组技术参数

	CRH1	CRH <sub>2</sub> -200	CRH <sub>2</sub> -300	CRH3	CRH5	CRH <sub>380AL</sub>	CRH <sub>380BL</sub>
最高运营速度(Km/h)	250	250	350	350	250	380	380
列车长度(m)	213.5	201.4	201.4	200	211.5	403	400
编组形式	5动3拖	4动4拖	6动2拖	4动4拖	5动3拖	14动2拖	8动8拖
动车配置方式	分散	分散	分散	分散	分散	分散	分散
转向架方式	独立式	独立式	独立式	独立式	独立式	独立式	独立式
定员(人)	668	610	610	557	601	1061	1026
车型宽度(mm)	3331	3380	3380	3257	3200	3380	3257
列车重量(t)	420.4	345	366	425.08	451	732	1000
最大抽重(t)	16	14	14	17	17	15	17
牵引总功率(Kw)	5500	4800	8200	8800	6770	20,440	18,400

的二等座车采用固定座椅外，其余车型均采用了可旋转座椅，全车定员 557 人。

#### 1.2.4. CRH5 动车组

CRH5 型动车组采用动力分布式设计，以法国阿尔斯通的 Pendolino 宽体摆式列车为基础，但取消摆式功能，而车体以意大利铁路 ETR 摆式动车组为原型，营运速度为 200 公里以上。CRH5 行车的 2 个动力单元分别采用 3M + 1T 和 2M + 2T 的编组形式，最高运营速度为 250 km/h，最高实验速度为 305 km/h。该动车组采用交直交的传动方式，目前用于北京铁路局、济南铁路局、武汉铁路局等单位。

#### 1.2.5. CRH380A 动车组

CRH380A 是由中国南车集团青岛四方机车车辆股份有限公司生产，持续运营速度为 350 km/h，最高运营速度为 380 km/h，最高实验速度为 486.1 km/h。

CRH380A 有 8 辆编组和 CRH380AL16 辆长编组两种。南车四方机车车辆股份有限公司的 CRH380A 是青岛四方的设计人员在 CRH2C(CRH2-300)型电力动车组基础上自主研发的 CRH 系列高速动车组。CRH380A 系列为动力分散式、交流传动的电力动车组，采用了铝合金空心型材车体。

#### 1.2.6. CRH380B 动车组

CRH380B 型电力动车组(或称 CRH3-380 型)，是中华人民共和国铁道部为营运新建的高速城际铁路及客运专线，由中国北车集团唐山轨道客车有限责任公司和中国北车集团长春轨道客车有限责任公司在 CRH3C 型电力动车组基础上自主研发的 CRH 系列高速电力动车组，也是“中国高速列车自主创新联合行动计划”的重点项目之一，并将以此为基础研制时速 400 公里的 CIT400B 检测车。

## 2. 高速动车组的牵引传统控制系统主电路比较分析

### 2.1. 各车型主参数对比

表 2。

### 2.2. CRH 系列动车组各部分结构差异

CRH 系列动车组在变流器结构及中间直流环节对 2 倍频谐波的处理方面存在着差异：同时在控制方式上也存在不同，致使各型动车组的牵引特性出现细小的差别：

#### 2.2.1. 变流器电路结构差异

CRH 系列动车组都采用四象限脉冲变流器，但其 CRH1、CRH3 和 CRH5 采用两电平脉冲变流器，CRH2 采用三电平脉冲变流器。

#### 2.2.2. 中间直流环节差异

单相交流供电系统中，脉冲整流器输出中总是含有二次谐波，将引起中间直流环节电压脉动，需要采取措施予以消除，保持直流电压稳定。

CRH2 型动车组在中间直流环节不设置谐振电路，而是通过逆变器的软件控制，调节逆变器频率，使逆变器输出电压在正负周期的电压与时间乘积趋于相等，来消除二次谐波电压的影响，大幅度抑制牵引电动机电流脉动现象和转矩脉动现象。

CRH3 型动车组设置了二次谐波吸收回路，通过 LC 串联谐振电路来消除二次谐波，电感为 0.603 mH，电容量 4.42 mF。

从上述看出来，CRH1、CRH3 和 CRH5 型动车组的技术特征互相差不多，所以通过 CRH2 型动车组和 CRH5 型动车组的牵引传统系统比较，可以进一步了解中国高速动车组。

**Table 2.** The traction drive system comparison of the cars  
**表2.** 各型车牵引传动系统对比

项目	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5	
容量	2100KVA	3060KVA	5640KVA	5262KV A	
主变压器	牵引绕组	4-900V/585A	2570KV A1500V-875A*2	1550V-1410KVA*4	1770V-495*6
	辅助绕组	无	490KVA400V1225A	无	无
	电路结构	两电平	三电平	两电平	两电平
四象限脉冲整流器	输入	AC900V/800A	AC1500V-875A	AC1550V-910A	AC1770V
	输出	DC 1650V	DC2600-3000V/432A	DC3600V	DC3600V 540A
	开关频率	450HZ	1250HZ(载波)		250HZ
中间直流环节	电压	DC1650V	DC 3000V	2700/2800-3600V	DC3600V
	L2-C2	无	无	4.42Mf, 0.603mH	无
	支撑电容	4 mF	1.25 mF	3.0 mF	9.01 mF
	电路结构	两电平	三电平	两电平	两电平
电压型逆变器	DC输入	DC 1650V	DC3000V-432A	DC2700-3600V	DC3600V
	AC输出	0-1287V/800A (相)	2300V-424A	2700V-2383/1843KW	2462V-161A
	开关频率	900 HZ	1250 HZ(载波)	0~200 HZ(输出)	84 HZ(额定)
电机控制方式	矢量	矢量	矢量	矢量	
编组形式	2(2M + 1T) + (1M + 1T)	4M + 4T	2(2M + 1T) + 2T	(3M + 1T) + (2M + 2T)	
一个逆变器控制电机数	2	4	8	1	

### 3. CRH2 和 CRH5 牵引传统控制系统比较分析

在牵引传动控制方面，有很多车型是相近或者相似的，本文主要针对具有典型代表意义的 CRH2 和 CRH5 型动车组的牵引传动系统进行对比分析。分别从牵引变流器的控制、牵引逆变器的控制两个方面进行了分别介绍和说明，并且从技术层面上对比了两者的区别。

#### 3.1. CRH2 型动车组的牵引传统控制系统

牵引电动机采用矢量控制策略，控制方式简单，使整个牵引传动系统具有良好的动态性能和控制精度。CRH2 型动车组脉冲整流器采用恒电压控制，牵引逆变器采用矢量控制。

##### 3.1.1. CRH2 型动车组的脉冲整流器控制原理

脉冲整流器的控制由电压控制、电流控制 2 部分组成。控制原理图 1[4]所示。

###### 1) 电压控制

为了使脉冲整流器的输出电压  $U_d$  与目标值  $U_d^*$  相一致，需要计算出二者的电压偏差  $\Delta U = U_d^* - U_d$ ，并将其偏差值反馈到恒电压控制单元，进行恒电压控制。将恒电压控制单元的输出值  $I_{N1}^*$  与来自逆变器输出功率计算所得到的二次电流  $I_{N2}^*$  电流相加，其结果作为脉冲整流器输入电流  $I_N^*$ 。

###### 2) 电流控制

电流控制就是要保证四象限的功率因数尽量为 1。电流控制单元需要计算出与  $u_N$  同相位、幅值与  $I_N^*$  相同的正弦波瞬时电流指令值  $i_N^*$ 。然后，还要计算脉冲整流器输入瞬时电流  $i_N$  与瞬时电流给定  $i_N^*$  之间的



通过矢量控制,把牵引电动机定子电流  $I$  分解到  $d$ - $q$  坐标系中的  $d$ ,  $q$  轴上,  $d$  轴电流分量相当于励磁电流,  $q$  轴电流分量相当于产生转矩所需的电流,实现定子电流的解耦,可按照直流电动机的控制思路,对异步电动机的转矩和磁场分别独立控制。

#### 4) 电压前馈计算

根据  $d$ 、 $q$  轴电流给定  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  与逆变器频率  $f_1$  及电机常量,计算前馈电压给定值  $E_d^*$ 、 $E_q^*$ 。

#### 5) 恒电流控制

为了使  $d$ 、 $q$  轴的反馈电流  $i_d$ 、 $i_q$  分别追随于  $d$ 、 $q$  轴的电流给定  $i_d^*$ 、 $i_q^*$ ,将各自的电流偏差输入到 PI 控制器,由此得到的电压分别作为  $d$ 、 $q$  轴的反馈电压  $u_d$ 、 $u_q$ 。

#### 6) 转差频率控制

为了让  $q$  轴的反馈电流追随于  $q$  轴电流给定  $i_q^*$ ,将各自的电流偏差输入到 PI 控制器,由此得到转差频率补偿值  $\Delta f_2$ 。控制系统在不能进行电压控制的 1 脉冲范围实施。在此范围,转差频率给定值  $f_2^*$  加上差频补偿值  $\Delta f_2$ ,作为转差频率  $f_2$ 。

#### 7) 控制模块切换

为了在 VVVF 范围内实施电压控制,在输出电压固定的 1 脉冲区域实施差频控制,需要根据逆变器的频率来切换控制器的动作[6]。

## 3.2. CRH5 型动车组的牵引传统控制系统

CRH5 型动车组牵引系统使用交直交传动方式,主要由受电弓、主断路器、牵引变压器、牵引变流器及牵引电机组成。受电弓通过电网接入 25 kV 的高压交流电,输送给牵引变压器,降压成 1770 V 的交流电。降压后的交流电再输入牵引变流器,逆变成电压和频率均可控制的三相交流电,输送给牵引电机牵引整个列车。

CRH5 动车组的一套变流装置中有两组四象限整流器、两组逆变器、一组牵引控制装置、一组辅助逆变器、冷却系统构成,每一组逆变器控制一台牵引电机。变流器的主要功能是将 25 KV/50 HZ 的单相交流电压通过牵引变压器降压后,输出单相 AC1770 V/50 HZ 的电压,经四象限整流得到 3600 V 的中间直流电压,再经逆变器输出电压频率可调的 0~2808 V 的三相交流电压来控制每台电机。

### 3.2.1. CRH5 型动车组整流器控制原理

CRH5 型动车组的整流器控制环节和 CRH2 的整流器控制环节整体比较相似,也是采用瞬态电流控制的策略实现的,但是在具体细节方面依然存在一定的区别和差异。

瞬态电流控制是在间接电流控制策略的基础上,通过添加瞬时电流控制环节的一种控制策略,弥补了间接电流控制中动态响应慢、对系统参数变化不能很快做出调整等缺点。该控制策略是电压外环和电流内环相结合的双闭环控制,电压外环采用 PI 控制器,通过将直流侧输出电压  $U_{dc}$  与其给定值  $U_{dc}^*$  的偏差信号进行 PI 调节,得到网侧电流给定值的幅值  $I_{N1}^*$ ,为减轻电压外环 PI 调节器的负荷,改善 PI 调节器的动态响应,用直流侧输出功率除以网侧电压有效值来计算给定电流的有效分量  $I_{N2}^*$ ,并将它和  $I_{N1}^*$  相加,共同作为网侧电流的给定幅值  $I_N^*$ ,在牵引工况时,期望经整流器控制电路所得的网侧电流与网压同相位;对于电流内环,由于其主要目的就是在确保稳定条件下,加速电流响应,因而只采用比例调节器,且比例系数不能过大以保证将系统稳态误差限制在给定范围内。去具体电路框图与 CRH2 型车相同,参见图 1。

但是在 SPWM 开关脉冲产生环节,CRH5 采用了载波移向多重化的方式实现了大功率输出、高效率

运行、降低高次谐波等功能。将两个单相全桥电压型整流器并联，共同为两个牵引逆变器供电。在 CRH5 中采用的半周期载波移向两重化的方式实现，将三角载波相位错开  $90^\circ$ 。其具体优点有[7]：

- a) 实际载波频率提高一倍；
- b) 叠加后的网侧电流各次谐波部分抵消，使网侧电流谐波总量减小，提高了网侧功率因数；
- c) 所选用的功率器件功率减小；
- d) 输出功率提高，效率提高：小功率整流模块的开关管损耗比较小，从整体上看，输出效率提高，因而输出功率也相应增大；
- e) 提高了系统的可靠性：如果一个整流器出现故障，则可以通过切除故障部分，另一个整流器正常工作以提高系统可靠性。

同时采用这种策略在控制中会增加控制的复杂程度，一定程度上造成了一定的问题，但是其在谐波控制方面起到的作用是十分显著的。

### 3.2.2. CRH5 型动车组逆变器控制原理

CRH5 型车的逆变器控制和 CRH2 型车采用的控制方法是一样的，都是采用间接矢量控制的方式，而间接矢量控制采用的转子磁链定向的方式来实现，如图 3[8]所示，在控制中采用转矩内环和磁链外环相结合的方式，在控制中，利用了转差频率控制的思想，在气隙磁通不变的情况下，电磁转矩和转差率成正比：同事通过转差频率和实际转速确定定子频率，从而保证定子频率随转子频率同步变化，最终实现，其速度的平滑过渡。

### 3.3. CRH5 和 CRH2 牵引传动系统异同

通过前文对于 CRH2 和 CRH5 型车牵引传动系统的简单介绍，可以清晰的看出两者在控制策略方面有一定的类似，但是在细节方面依然存在不同，在整流器方面，CRH2 采用的是三电平的主电路结构，而 CRH5 采用的载波移向多重化的方式，进行谐波的消除和减少，两者在谐波抑制方面均有不同的作用，三电平结构可以一定程度上减少各次谐波的含量，而载波移向的方式可以消除特定次数的谐波[9]。而在控制方面均是采用瞬态电流控制的方法，实现电压和电流环的双环控制策略。

而在逆变器方面，CRH2 和 CRH5 型动车组的均采用同步调制、异步调制、预先计算角度及方波四种调制方式相结合产生驱动 IGBT 通断的 PWM 脉冲，利用转子磁场定向的矢量控制形成磁链闭环及电流闭环系统。但是两者的不同在于，CRH5 型动车组的电机矢量控制增加了磁链闭环，得到 d 轴电流指

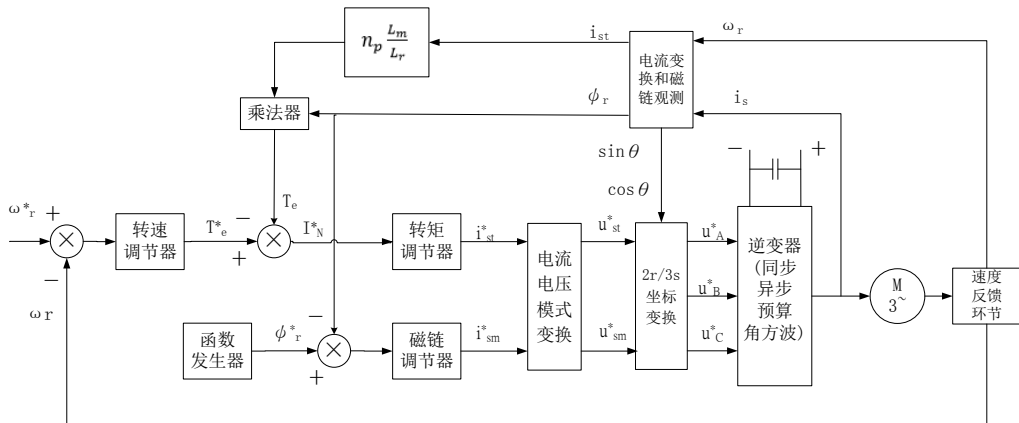


Figure 3. Control diagram of CRH5

图 3. CRH5 矢量控制框图



令，使控制更加可靠[10]。

#### 4. 结论

本文通过对比中国目前主流运行的 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5、CRH380A 和 CRH380B 高速动车组牵引传动系统的异同得出以下结论：

在四象限整流器方面，CRH2 和 CRH380A 采用的是三电平变流器，而 CRH2、CRH3、CRH5 和 CRH380B 采用的均是两电平结构，都采用了多重化方式。

对于中间直流环节的二次脉动，CRH2、CRH5 和 CRH380A 通过逆变器的软件控制，调节逆变器频率，使逆变器输出电压在正负周期的电压与时间乘积趋于相等，来消除二次谐波电压的影响，而 CRH3 和 CRH380B 设置了二次谐波吸收回路，通过 LC 串联谐振电路来消除二次谐波；各车型都采用异步电机的矢量控制，以间接矢量控制为主。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李秀明, 杜赞睿 (2010) 中国高铁发展分析. *科技致富向导*, **9**, 34
- [2] 乔英忍 (2006) 我国铁路动车和动车组的发展(上). *内燃机车*, **2**, 1-3
- [3] 杨中平, 吴命利 (2013) 轨道交通电气化概论. 中国铁道出版社, 北京.
- [4] 朱琴跃, 王俊哲, 刘爱雷等 (2013) CRH1 与 CRH2 动车组牵引变流器性能比较与优化. *计算机工程与应用*, **21**, 255-261.
- [5] 江承武 (2011) CRH2 三电平牵引整流器的控制研究. 硕士论文, 西南交通大学, 西南.
- [6] 张喜全 (2012) 电力牵引传动及控制. 中国铁道出版社, 北京.
- [7] 冯江华 (2006) 电力电子技术与铁路机车牵引动力发展的方向. *变流技术与电力牵引*, **2**, 63-66.
- [8] 宋文胜, 刘志敏, 冯晓云 (2007) 四象限变流器控制策略研究与仿真. *电力机车与城轨车辆*, **3**, 20.
- [9] 章志兵, 张志学, 姚中红等 (2012) CRH2 型动车组网侧变流器谐波研究及电感设计. *机车电传动*, **2**, 65-69.
- [10] 杨显进 (2010) CRH5 牵引变流器的应用. 硕士论文, 西南交通大学, 西南.