DOI:10.13890/j.issn.1000-128x.2011.03.009

研究开发

新一代高速动车组牵引系统参数匹配设计与研究

江 靖

（南车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111）

作者简介：江 靖（1954-），男，硕士，高级工程师，现从事动车组总成技术研究。

摘 要：从牵引传动系统参数匹配设计方面展开论述，介绍新一代高速动车组牵引系统的基本组成、控制原理及变压器、变流器、电机三大部件技术参数的匹配设计，最后通过系统地面组合试验及装车考核验证了该系统完全满足新一代列车总体性能要求。

关键词：动车组；交流传动；牵引系统；参数匹配；牵引功率；动力单元

中图分类号：U266.2；U292.91+4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-128X(2010)03-0009-04

Traction System Parameter Matching Design and Research of New-generation High-speed EMUs

JIANG Jing

(CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: Traction system parameter matching design was expounded. The structure, control principle and transformer, converter, motor technique parameter matching design of key parts were introduced. By combined earth test and on-car operating, the system was proved to meeting the general expecting of new-generation high-speed EMUs.

Key words: EMUs; AC drive; traction system; parameter matching; traction power; power unit

0 引言

本文从新一代高速动车组的牵引传动系统参数匹配设计、系统试验验证等方面进行论述。按照动车组总体技术要求，进行系统的牵引特性计算及部件的容量计算，就牵引力和牵引功率、动拖比、电机转速与传动比关系、启动牵引力、部件参数等方面进行分析。

1 整车性能指标

动力分散型动车组的牵引传动系统较动力集中型动车组和机车的更为复杂，需要根据整车的动力性能总体要求进行牵引计算和容量计算，结合车底设备布置和采用的牵引设备的能力等级首先确定整车的编组形式，然后据此确定每个基本动力单元的配置方案，最后进行基本动力单元各个部件的关键参数设计及基本结构形式的选择。

根据运营需求，结合既有动车组成熟的设计、试验经验，经过系统分析，制定新一代高速动车组的整体牵引性能指标，见表1。

表1 动车组整体性能指标

持续运行速度	350 km/h
最高运营速度	380 km/h
最高试验速度	≥ 420 km/h
350 km/h 的剩余加速度	≥ 0.05 m/s²
0~200 km/h 平均加速度	≥ 0.4 m/s²
单位阻力公式	ω= 5.2+0.038 v+0.00112 v^2 (N/t)

2 参数匹配设计

2.1 牵引力及牵引功率的确定

速度指标主要跟动车组的牵引能力及功率关系较大。因此根据总体技术要求，通过牵引特性计算进行牵引能力的估算。

牵引计算的公式 $F=W(1+\gamma)\alpha+r$（kN）

式中：W为车重；r为列车阻力；γ为惯性质量系数；α为剩余加速度；F为牵引力。

在确定以上参数后进行相关计算，确定牵引力的

收稿日期：2011-04-26

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大小。

车重：车重越小，所需的牵引力就越小，总体要求对牵引系统的约束就越宽松，牵引系统提升的难度就越小。根据整车设计要求，动车组采用16辆编组，整车的重量控制在约890 t。

齿轮传动效率：根据动车组齿轮传动设计经验，取值为0.95。

根据牵引计算公式，确定牵引总功率及牵引力参数见表2。

表2 牵引总功率及牵引力参数计算

速度/km·h^{-1}	牵引力/kN	剩余加速度/m·s^{-2}	牵引总功率/kW
350	185.562	0.05	18 990
380	180.127	0.02	19 013

考虑到实际空气阻力有一定误差等因素及考虑到牵引系统部件恶劣工况下的可靠性，增加10%以上的裕量，动车组的牵引功率确定为约21 000 kW。

2.2 动拖比的确定

改变动拖比是适应动车组高速运行的重要手段之一，根据牵引计算确定的21 000 kW牵引总功率，进行动力单元配置核算见表3。

表3 动力单元牵引功率核算

动力单元数目	每单元的牵引功率/kW	每台电机的功率/kW
8	2 611.25	326.41
7	2 984.29	373.04
6	3 481.67	435.21
5	4 178.00	522.25
4	5 222.50	652.81

从表3可以看出，如果设置6个以下的动力单元，势必造成牵引系统各部件的功率在既有CRH2动车组的基础上必需大幅度地提高，使牵引变压器、牵引电机的体积加大，同时要求主变流器的输入输出功率大幅增大，带来动车组各设备安装空间紧张及轴重超标等一系列问题；如果设置8个动力单元，会带来辅助电源装置等辅助设备的安装位置紧张等问题。因此综合考虑动车组设置7个动力单元较为合适，牵引电机功率为375 kW以上，考虑一定裕量，动车组单台电机功率确定为385 kW。

根据以上分析，动车组编组采用14M2T的编组形式，具体为：Tc+M+M+M+M+M+M+M+M+M+M+M+M+M+Tc，其中1、16车为拖车，2～15车为动车，共分为7个基本动力单元（见图1）。每个基本动力单元共有1台牵引变压器、2台主变流器、8台牵引电机，见图2。

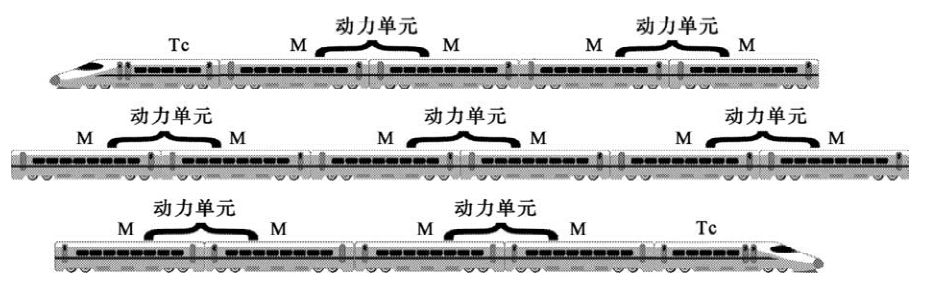

图1 动力单元配置图

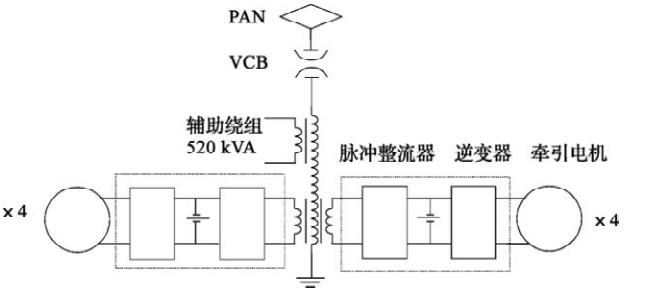

图2 牵引系统组成示意图

2.3 传动比的确定

针对速度提升后牵引电机轴承面临的承受更高转速的问题，结合牵引电机轴承的最高允许使用转速的限值，通过降低齿轮传动比的方法降低牵引电机轴承的最大使用转速，从而降低所需要的牵引电机持续工作转速。

根据牵引电机的工作转速情况，保证在车轮全磨耗的情况下动车组运行速度大于380 km/h及新轮情况下动车组试验速度大于420 km/h，对齿轮传动比值进行核算，动车组设置的齿轮传动比应小于2.399，最终确定传动比为2.379。

2.4 启动牵引力的确定

根据动车组0~200 km/h的平均加速度大于0.4 m/s^{2}的加速性能要求及牵引计算拟定的单台电机牵引功率385 kW条件，同时考虑到充分利用牵引系统部件的启动能力，采用恒力矩启动方式进行近似计算，整车牵引特性曲线见图3，启动阶段采用0~50 km/h恒力矩，50~167 km/h力矩线性下降，167 km/h以后进入恒功区。

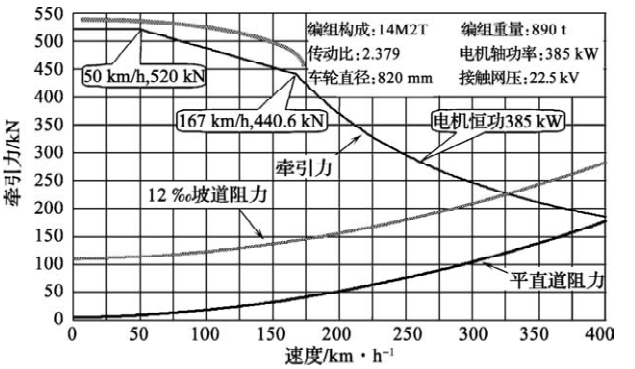

图3 列车牵引特性曲线

按上述牵引特性曲线计算动车组可满足0~200 km/h平均加速度为0.4 m/s^{2}的加速性能要求，动车组启动性能参数见表4。

表4 动车组启动性能参数

速度范围	平均加速度/m·s^{-2}	启动牵引力/kN
0~50 km/h	0.52	520
0~200 km/h	0.47	-

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5　牵引系统容量的确定

根据上述确定的参数和动车组牵引系统经验值，具体列表见表5。对牵引系统进行容量计算，计算出主变流器的输出功率为1 635 kW，牵引变压器牵引容量为1 703 kW×2/0.97≈3 511 kVA以上，加上辅助绕组的520 kVA，牵引变压器的总容量为4 031 kVA。

表5　确定的牵引系统参数

牵引电机功率	385 kW
牵引传动比	2.379
启动牵引力	520 kN(0~50 km/h)
接触网电压	AC 25 kV
牵引电机的功率因数	0.87
牵引电机的效率	0.94
主变流器的效率	0.96
牵引变压器的效率	0.99
牵引变压器的功率因数	>0.95

2.6　牵引系统部件的主要参数确定

2.6.1　牵引电机主要参数

1）最高工作频率确定

电机转速与列车速度对应关系：

$V=60\times\pi\times D\times n/(2.379\times10^6)$

转子频率：$f=p\times n/60$

定子频率：$f_0=f\times(1+s)$

式中：V为列车速度，km/h；D为车轮直径，mm；p为电机极对数，取2；n为电机转速，r/min；s为转差率，可取0.05。

因此可以计算出定子工作最大频率（即主变流器的最大输出频率）为215 Hz。

2）最高工作电压确定

逆变器最大输出电压计算值：

$U=U_{dc}\times0.78=3\,100\times0.78=2\,418$ V

考虑开关损耗等因素，牵引电机的额定线电压取2 300 V，根据表5的电机额定功率、功率因数、效率等参数，计算得出每台牵引电机的额定工作电流为：385 kW×1000/0.94/1.732/2300V/0.87≈119 A。

2.6.2　主变流器的主要参数

根据牵引电机功率385 kW，可计算得出主变流器的功率。

牵引工况逆变器输出：

$P_I=4\times385/0.94\approx1\,635$ kW

牵引工况整流器输出：

$P_C=1635/0.985\approx1\,660$ kW

牵引工况脉冲整流器输入：

$P_{TR}=1660/0.975\approx1\,703$ kW

中间直流环节电压的分析：主变流器功率元件采用电压等级3 300 V/1 500 A的IPM，其集电极-发射极阻断电压为3 300 V，且主电路为三电平方式，所以中间直流环节电压应满足：

$2\times3300\text{ V}\geq(k_1\times k_3\times U_{DCmax}+\Delta V_{CE})\times k_2$

式中：k_1为过电压系统，取1.15；k_2为安全系数，取1.2；k_3为三电平主电路的串联系数，取1.1；ΔV_{CE}为IPM关断时的最大尖峰电压。

计算得出$U_{DCmax}\leq3\,557$ V。

结合变压器制造工艺及综合分析，将脉冲整流器输入电压由1 500 V提升至1 658 V，变流器中间直流环节电压取值为3 100 V。

同时，为使新一代高速动车组主变流器有更大余量、更大再生制动能力，新一代高速动车组采用3 300 V/1 500 A的IPM元件，较原3 300 V/1 200 A IPM元件有10%以上的功率提升能力。

2.6.3　牵引变压器的主要参数

根据上述确定的参数，变压器的输入容量计算为2×1703/0.97+520=4031 kVA。

变压器的牵引绕组输出电压为1 658 V，辅助绕组输出电压为400 V。

主变流器输入电感要考虑变流器的输出功率及电流波形品质，经综合研究分析，牵引变压器一次绕组对单个二次绕组的电感规格值设定为1.195 mH。

3　牵引仿真计算

依据编组为14M2T、整车质量890 t、传动比为2.379、电机功率385 kW及图3设定的牵引特性曲线，对牵引系统能力进行仿真计算，计算结果见图4。

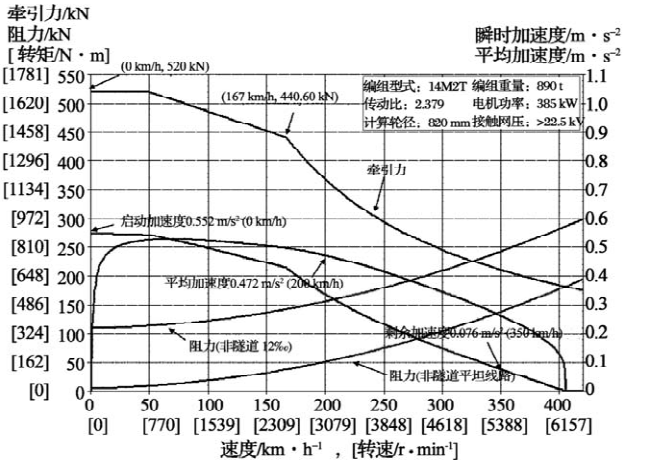

图4　牵引特性曲线及牵引计算结果

从图4中可以得出：运营速度350 km/h的剩余加速度为0.076 m/s²，加速到200 km/h的平均加速度为0.472 m/s²。以上计算结果完全满足表1动车组总体技术指标的要求。

在确定了牵引和再生制动曲线之后，还必需根据实际线路图谱（里程、限速、坡道、弯道、隧道、分相区设置、网压等等），按照实际运行工况，对上行、下行线路进行仿真计算，对牵引系统性能进行核算，确认是否能满足运营要求，并对各部件的温升进行核算。

图5为典型区段北京南—天津南线路仿真计算示

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

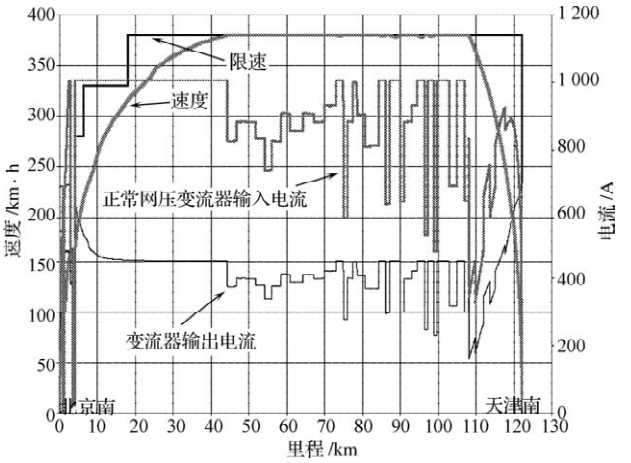

图 5　动车组仿真计算示意图（运行速度、电流对里程曲线）

意图，通过对全线路进行仿真及核算，新一代动车组牵引系统及部件完全能满足实际运营要求，各部件的温升均在允许范围之内。

4　试验验证

4.1　系统地面组合试验

在牵引系统各部件设计完成后，必须在地面按照动车组基本动力单元的配置情况，将主断路器、牵引变压器、主变流器、4 台牵引电机按实际的动力单元电路组合后，进行系统试验，以验证牵引传动系统的性能是否符合设计要求。下面以牵引特性试验和模拟自动过分相试验为例说明牵引系统完全符合系统设计要求。

图 6 为牵引特性曲线验证试验，从试验结果来看，确认电机输出转矩都达到转矩设定值的 95% 以上，说明系统匹配合理，系统控制性能完全符合设计要求。

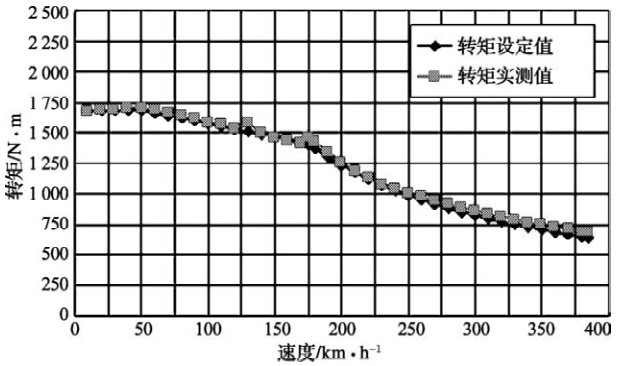

图 6　牵引特性曲线试验

为考核牵引系统对地面过分相系统的适用性，验证牵引系统是否能稳定、可靠地通过分相区，需要对动车组通过线路的分相区工况进行模拟。试验时模拟实际运行情况，每 5 min 模拟一次过分相（断电时间控制在 300 ± 50 ms，与实际自动过分相断电时间一致）。整个试验过程无任何部件损坏，系统各部件能可靠工作，记录波形如图 7 所示。通过试验证明牵引系统能适应自动过分相工况，系统工作稳定可靠。

4.2　实际线路运行试验

在通过地面组合试验证明满足设计要求之后，牵引系统装车完毕，还必须进行正式运营之前的线路试验，检验高速动车组牵引系统的性能和线路适用性，对牵引和再生制动性能进行验证，具体包括加速性能试验、再生制动性能试验、空转滑行试验及谐波测量等试验项目，CRH380A 牵引系统从 2010 年 11 月到 2011 年 5 月经过长达 6 个月的线路试验及考核，牵引系统性能满足整车总体技术要求，并在京沪线冲高速试验中速度达到了 486.1 km/h。

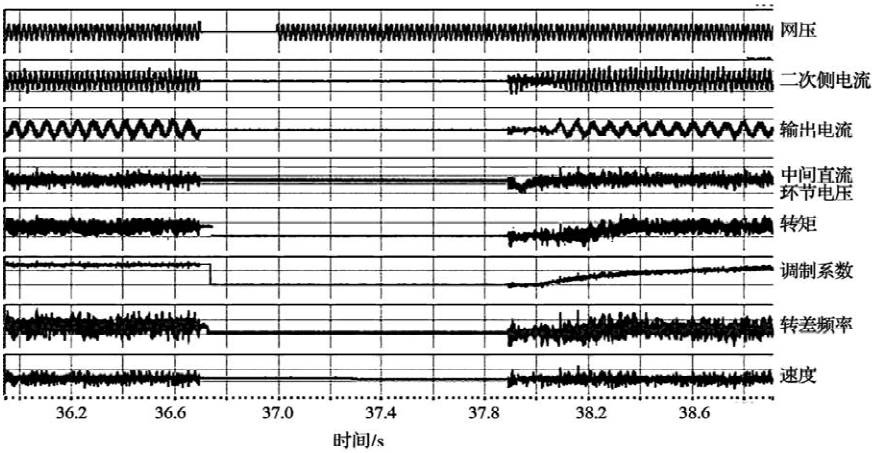

图 7　牵引系统模拟自动过分相试验

5　结论

新一代高速动车组牵引系统是在既有动车组牵引系统技术平台基础上进行的自主创新设计。在进行系统设计时充分考虑各系统的参数匹配和各部件可靠性、安全性设计。

牵引系统以仿真计算、地面系统组合试验等形式进行了系统性能及可靠性试验验证，并在系统装车后进行样车牵引系统的型式试验，充分验证了牵引系统的技术性能。

采用上述系统的 CRH380AL 新一代高速动车组在京沪线经过长时间的线路试验测试及线路考核，牵引系统性能优良，各部件工作正常可靠。该牵引系统进一步优化发展将覆盖更大范围的应用，将进一步推动我国动车组往前发展。

参考文献：

[1]　丁荣军. 现代轨道交通牵引传动及控制技术研究与发展[J]. 机车电传动, 2010(5)：1-8 .

[2]　黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京：机械工业出版社, 1998.

[3]　张卫华, 丁莉芬, 王伯铭. 动车组总体与转向架[M]. 北京：中国铁道出版社, 2009.

（下转第 36 页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 系统功能及传输策略

传输故障数据时，ERM（事件记录仪）与TSC1之间的通信过程与GPRS方式中ERM与TSC1的通信过程一致。具体过程为：TSC把从ERM中获得的数据利用WLAN发送，采用直接序列扩频（DSSS）作为传输方式发送给列车故障数据采集计算机。该计算机装有WLAN网卡，与TSC1的网卡形成从计算机到计算机的局域网。此外列车故障数据采集计算机可通过Internet将故障数据传至多地的客户端。

从WLAN链路中接收到数据在计算机上的体现是二进制数据文件。列车故障数据采集系统一方面通过WLAN网卡与车载TSC1建立连接，从ERM服务器中下载二进制文件数据包；另一方面按约定协议对数据包中有效数据进行解析，解析过程中同时也把数据存入数据库。此外，系统还要对解析后的数据进行显示，必要时可以进行环境数据的波形回放，以便对列车故障事件进行分析诊断。

3 数据解析的实现

中低速磁悬浮列车信息无线传输无论采用GPRS方式还是采用WLAN方式，客户端或列车故障数据采集计算机接收到的数据包均是二进制数据。在解析接收的数据时，可把数据分2种类型：一种是开关量，此类数据用一个二进制位来表示车辆或车辆某部件的0状态和1状态，例如本端操作权、车门开关状态等；另一种是数值量，此类数据可以由一个字节中的几位对应的十进制值表示，也可以由一个完整的字节对应的十进制值表示，还可以通过几个字节对应的十进制值按一定关系计算后的结果表示，例如速度、主风缸压力等。

为了方便、快速地解析数据包，针对2种类型的数据编写了GetBooleanValue和GetIntValue 2个方法。

1）GetBooleanValue方法

GetBooleanValue方法是用于解析开关量的方法，它的代码及注释如下。

```
private bool GetBooleanValue(Byte[] data, int byteIndex, int bitIndex)
{
    BitArray dat = new BitArray(data);//将字节数组转换成位数组
    return dat.Get(byteIndex * 8 + bitIndex);//解析对应位并返回
}
```

从代码可以看出，该方法包含3个参数。参数data是一个字节数组，地面系统接收到的磁悬浮列车各种信息的数据流；参数byteIndex是一个整型量，它表示需要解析的位在数组中的字节索引；参数bitIndex也是一个整型量，它表示需要解析的位在该字节中的索引。BitArray类是.NET框架中位于System.Collections命名空间中的一个类，用于管理位值的压缩数组，其中蕴含了丰富的位操作方法，在GetBooleanValue方法中正是使用了BitArray类中提供的Get方法来取得相应位的值。GetBooleanValue方法的返回值是一个布尔型，当需要解析的位的值是0时返回False，1时返回True。

2）GetIntValue方法

GetIntValue方法是用于解析数值量的方法，它的代码及注释如下。

```
private int GetIntValue(Byte[] data, int byteIndex, int startBitIndex, int length)
{
    BitArray dat = new BitArray(data); //将字节数组转换成位数组
    int i;
    int re = 0; //返回值
    for (i = 0; i < length; i++) {//以循环累加方式计算返回值
      if (dat.Get(byteIndex * 8 + startBitIndex + i))
        re = re + (int)Math.Pow(2, i);
    }
    return re;//返回
}
```

从代码可以看出，该方法包含4个参数。参数data和参数byteIndex的意义与GetBooleanValue方法中的一致；参数startBitIndex是一个整型量，它表示需要解析的数据在该字节中的开始索引；参数length也是一个整型量，它表示需要解析的数据在字节中占的位数，即位长度。GetIntValue方法的返回值是一个整型。

4 结语

中低速磁悬浮列车远程实时监视及地面故障诊断系统能全面、及时、准确地掌握中低速磁悬浮列车的运行状态与故障状态，协助维护人员和管理人员在线处理运行列车的故障和意外情况，从而提高中低速磁悬浮交通试验线系统的安全性与可靠性。

参考文献：

[1] 单 晟，刘黎明.机车状态实时监测与智能诊断及维护支持系统[J] .机车电传动，2009(5)：41-43.

[2] 赵义平. 802.11n协议的研究与无线接入点功能的实现[D]. 成都：西南交通大学，2009.

（上接第12页）

[4] 李永东. 交流变频调速在轨道交通牵引系统中的应用[J]. 电气时代，2005(5).

[5] Ryoo H J. 采用组合试验验证HSR 350X 牵引系统性能[J]. 电力机车与城轨车辆，2004(5).

[6] 成 喜. CRH2-300型350 km/h动车组用YQ-365异步牵引电动机[J]. 机车电传动，2009(6)：1-5.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net