

双流制窄轨电力机车用异步牵引电机设计

丁禄振

(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 将牵引电机应用于双流制窄轨电力机车时, 由于窄轨机车轨距小, 所以牵引电机安装空间异常狭小, 比一般牵引电机在安装空间、电机结构、电磁负荷等方面的要求更加苛刻。针对窄轨双流制电力机车的运用特点和特殊要求进行了分析, 提出了牵引电机的设计要求和关键技术难点, 并对关键技术难点给出了相应的分析和解决措施。对该牵引电机的制造过程及电机试验测试情况进行了论述。试验结果表明, 该牵引电机达到了设计预期, 完全能满足设计要求。

关键词: 牵引电机; 窄轨; 双流制; 高磁通密度; 灌封式接线盒; 大尺寸轴承

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)12-0075-06

Design of Asynchronous Traction Motor for Dual-Voltage Narrow Gauge Electric Locomotive

DING Luzhen

(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Asynchronous traction motor was developed for dual-voltage electric locomotive on narrow gauge track. The gauge of the narrow gauge locomotive was smaller than the standard gauge, which resulted in the abnormally small installation space of the traction motor. The requirements for installation space, motor structure and electromagnetic load were more difficult compared to those of other traction motors. The application characteristics and special requirements of dual-voltage narrow gauge electric locomotive were analyzed. The design requirements and key technical difficulties of traction motor were put forward. The manufacturing process and the testing process of the dual-voltage traction motor were described. The test results show that the traction motor successfully meets all design requirements.

Key words: traction motor; narrow gauge track; dual-voltage; high magnetic flux density; potting junction box; large size bearings

0 引言

世界上标准轨的轨距是 1 435 mm, 窄轨轨距比标准轨小, 现存的窄轨铁路轨距主要有 1 067、1 000、762 mm 等。窄轨铁路铺设成本低, 轨道的曲率半径小, 车厢重量较轻, 可用于较大的路线坡度。窄轨铁路主要分布在亚、非、拉的英联邦国家, 中国在 20 世纪 70 年代援建非洲的“坦赞铁路”就是 1 067 mm 的窄轨铁路。澳大利亚和南非均拥有超过 2 万 km 的窄轨铁路, 轨距以 1 067 mm 为主。这些国家对窄轨机车的需求量较大, 但由

于制造技术实力薄弱, 没有机车制造能力, 所以机车的来源基本依靠进口。南非拥有轨距为 1 067 mm 的窄轨铁路 2 万多 km, 形成了铁路网, 其中电气化改造线路超过 1 万 km。其电气化铁路存在多种供电制式, 普遍的如 50 kV 交流、25 kV 交流、3 kV 直流等网压线路, 对窄轨电力机车有双流制跨线运营的要求^[1-3]。中国虽有窄轨直流电传动内燃机车牵引电机产品, 但尚没有交流传动的窄轨电力机车用异步牵引电机产品^[4]。随着国家“一带一路”战略实施, 轨道交通产品作为中国出口优势产品必将作为开路

作者简介: 丁禄振(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机设计与制造。

先锋,因此发展双流制窄轨轨道交通产品,满足世界多样化需求成为必然选择。

本文论述了一种双流制窄轨电力机车牵引电机的开发应用,针对该电机的运用特点分析了牵引电机的设计要求和关键技术难点,并给出了相应的分析和解决措施。本文还对该牵引电机的制造及试验测试情况进行了论述并给出结论。

1 双流制窄轨电力机车对牵引电机的特殊设计要求

1.1 轨距和轴重限制

本文论述项目窄轨机车轨距为 1 067 mm、轴重为 21.5 t;国内标准轨距和谐系列大功率机车轨距为 1 435 mm、轴重为 25 t^[5]。窄轨机车牵引电机的外形尺寸和质量与标准轨距机车牵引电机相比,受到了较大限制。根据总体设计要求,窄轨牵引电机外部轴向空间是标准轨的 75%,质量是标准轨牵引电机的 86%,但牵引电机发挥转矩需达到和谐系列标准轨大功率机车牵引电机相当水平,就需要对牵引电机的结构布置进行大幅调整。

1.2 双流制供电和跨线运输

机车应用于南非 TFR 公司的一般货物运输,线路中有 11 500 km 线路为 DC 3 000 V 供电,4 000 km 线路为 25 kV/50 Hz 供电,需要跨线运输。机车采用直流网供电时,直流网压为 1 800~4 500 V,变流器最大中间直流电压会出现 3 900~4 500 V 的非持续性高压,因此牵引电机的绝缘设计按照额定绝缘电压等级 3 900 V 设计,同时考虑 4 500 V 的非持续电压的影响,需要加强对过电压产生破坏且不可修复部位的绝缘设计考虑。

1.3 轴承配置设计限制

结合小齿轮和转轴强度设计计算,该电机传动端轴承内径最小为 150 mm;内径 150 mm 的标准滚柱系列轴承 NU330 在脂润滑条件下参考转速 2 200 r/min。该电机在考虑机车全磨耗下 100 km/h 运行速度,电机转速为 2 820 r/min,因此如何保证 NU330 轴承在脂润滑高转速下的温升及润滑是设计难点之一。

1.4 环境适应性

南非位于南纬 19°到 33°的半沙漠和沙漠地带,总体以高原为主,全国 2/3 以上的面积气候干旱,空气密度约为中国的 75%,同时南非夏季最高环境温度达到 50 ℃,给电机散热和绝缘设计带来较大困难^[6]。机车实际运行线路中还有一段下坡过隧道的线路,机车电阻制动能量聚集在隧道内,隧道顶部短时温度会达到 200 ℃,电机需要关闭强迫通风带电通过。这些给电机的防护、绝缘、温升等设计均带来考验。

2 高功率密度电磁设计

2.1 传动比选取

货运机车牵引电机比客运机车牵引电机的功率和转矩要求大,但额定运行速度和最大速度远低于客运机车,因此货运机车可以尽量设计大传动比来降低电机额定转矩,同时保证具有一定的恒功速度范围^[7]。该项目机车全磨耗下的齿轮直径为 1 140 mm,考虑机车齿轮箱最低面距轨面的安全距离、大齿轮节圆至齿轮箱外壁的安全距离及齿轮安全模数,大齿轮的最大齿数设计为 103;为了加大传动比,小齿轮采取内锥传动模式,尽可能减少小齿轮齿数,小齿轮齿数选取为 17,传动比为 103/17≈6.06。

2.2 电磁参数选取

窄轨电力机车用异步牵引电机的外形和质量受到轮轨尺寸限制,为了充分利用空间并在有效空间内实现大转矩发挥,需扩大冲片外径,缩短电机轴向长度。经综合考虑,本文采用 6 极电机,同时在电磁设计中取较高的电磁参数。在电磁参数选取时需注意保证牵引电机定子绕组的热负荷能够满足牵引电机温升限值要求;牵引电机的定转子磁密能满足硅钢片材料性能要求;牵引电机的最高转速点转矩能满足电机颠覆转矩倍数要求^[8-9]。

牵引电机整个牵引和制动特性曲线包含 3 个阶段:恒磁通阶段、恒功率阶段、恒电压阶段。对牵引电机起动点、额定点(恒功起始点)、进恒压点、最高工作转速点(恒功结束点)进行牵引特性核算^[10-13],核算结果如表 1 所示。由表 1 可知,牵引特性计算结果在全转速范围内满足机车牵引要求,同时牵引电机热负荷、磁负荷在合理范围内。

表 1 电机主要特征点牵引特性核算表

特征点	起动点	额定点	进恒压点	恒功结束点
机车速度/(km·h ⁻¹)	0	40	56	100
机车牵引力/kN	340.0	270.0	192.8	108.0
电机转速/(r·min ⁻¹)	0	1 090	1 520	2 724
电机转矩/(N·m)	8 533	6 785	4 866	2 715
定子频率/Hz	0.92	55.20	76.50	137.30
电机电压/V	62.9	1 720.0	2 340.0	2 340.0
电机电流/A	408	336	253.6	241
功率因数	0.965	0.82.0	0.788	0.832
效率/%	0	94.8	95.7	95.2
电机功率/kW	0	775	775	775
气隙磁密/T	1.044	1.044	1.044	0.616
定子齿部磁密/T	1.703	1.703	1.703	1.004
转子齿部磁密/T	1.906	1.906	1.906	1.124
定子电密/(A·mm ⁻²)	8.660	7.087	5.370	5.100
导条电密/(A·mm ⁻²)	9.51	7.56	5.40	5.73
端环电密/(A·mm ⁻²)	6.470	5.146	3.670	3.900
定子发热因数	9 361.5	6 270.0	3 603.0	3 248.7
定子铜耗/kW	26.49	17.75	10.19	9.21
转子铜耗/kW	16.440	10.400	5.300	5.977
颠覆转矩倍数	-	1.900	2.596	1.451

3 双流制供电制式绝缘结构设计

3.1 热因子

牵引电机采用有机硅绝缘系统。该系统为当今耐热性最好的绝缘系统, 耐温等级可达 220 ℃, 使电机可以在 200 ℃ 下长期运行^[14-15]。

绝缘结构热寿命可以用阿伦尼乌斯方程表示:

$$L = A_e^{B/T} \tag{1}$$

式中: L ——绝缘寿命;

$A、B$ ——常数;

T ——温度。

根据牵引电机设计预期, 考虑制造分散性等因素, 预计电机运行最高工作温度为 200 ℃, 按照绝缘等级 220 ℃ 级考核, 电机绝缘系统在 220 ℃ 热寿命最少为 20 000 h。

3.2 电因子

考虑直流网压供电时 4 500 V 的非持续电压的影响, 加强了对过电压产生破坏且不可修复部

位的绝缘设计。电机的匝间绝缘、直线边绝缘结构考虑 4 500 V 电压等级设计, 对于裸露的金属件, 电气间隙按照 4 500 V 电压等级设计。

接线盒部分, 受限于车下空间狭窄和空气电气间隙不足, 采用灌封式接线盒, 灌封材料采用对温度敏感性较低的道康宁 CN8760G 灌封树脂。灌封前采用单组分真空脱气和真空混料技术对灌封树脂进行脱气处理。

3.3 高原气候

海拔增高, 空气密度相对减少, 带电质点平均自由行程增大, 空气的电气绝缘强度下降。牵引电机运行环境海拔最高 2 000 m, 根据 GB/T 311.1—2012《高压输变电设备的绝缘配合》中的规定相对 1 000 m 海拔进行电气修正。

高海拔主绝缘加强系数为

$$K_H = 1 / (1.023 \, 1 - 0.023 \, 1H)^3 \tag{2}$$

式中: H ——电机运行的海拔高度。

根据式(2) 计算得出各个区段的修正系数, 如表 2 所示。

表 2 空气绝缘海拔修正系数

海拔高度 H/m	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
K_a	1.00	1.07	1.15	1.24	1.34

牵引电机承受的额定绝缘电压为 3 900 V, 按照最小 8 倍的绝缘设计安全裕度计算, 电机在标准气压下的对地绝缘强度必须大于 3 900 V×8×1.07≈34 000 V。

起晕电压与海拔高度(气压)的关系为

$$U_{kH} = U_{k0} \times \left(\frac{0.002 \, 9p}{t + 273} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{3}$$

式中: U_{kH} ——海拔 H 电机起晕电压;

U_{k0} ——标准气压下电机起晕电压;

p ——电机运行地点的气压;

t ——运行点最高气温。

因此, 海拔 2 000 m 相对海拔 1 000 m 的起晕电压修正系数:

$$K = [P_{1km}(T_{2km} + 273) / P_{2km}(23 + 273)]^{\frac{2}{3}} \tag{4}$$

将 $P_{1km} = 89.9 \, \text{kPa}$ 、 $T_{2km} = 50 \, \text{℃}$ 、 $P_{2km} = 79.9 \, \text{kPa}$ 代入式(4), 计算得出 $K = 1.15$ 。

电机起晕电压应取额定电压的 1.5 倍, 电机端

部绝缘按照额定绝缘电压等级 3 900 V 设计,同时考虑海拔 2 000 m 对起晕电压 1.15 的修正系数(海拔 2 000 m 相对 1 000 m、23 °C 下的修正系数),设计起晕电压应大于 $3\,900\text{ V} \times 1.5 \times 1.15 \approx 6\,800\text{ V}$ 。

4 紧凑型、可靠性机械结构设计

4.1 机座强度

窄轨机车异步牵引电机抱轴和吊挂等承重结构采用紧凑的一体化抱轴结构,如图 1 所示。每一个抱轴固定单元采用 T 型结构生根于压圈上,两边加铸支撑筋确保刚度;由于吊挂孔空间尺寸限定,将吊挂的一个支脚整体铸在压圈上,另一个支脚在筋板上焊接形成完整的吊挂结构,最终电机抱轴结构实现一体化铸造成型,并充分考虑零部件的铸造工艺性、加工工艺性、焊接可达性。

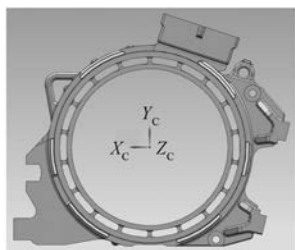


图 1 一体化抱轴结构

对机座强度进行有限元计算,计算依据 IEC 61373-2010 试验标准进行加载^[16],如图 2 所示。

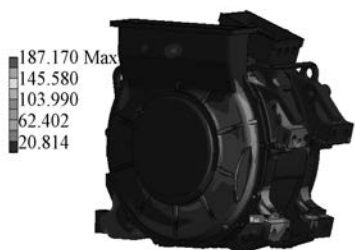


图 2 机座强度有限元计算

计算结果表明最大应力值出现在抱轴处,最大位移主要分布在非传动端端盖的通风口附近以及端面上。承受的最大应力强度为 187.17 MPa,远小于材料 GS-20Mn5 屈服强度 360 MPa,牵引电机机座结构的静强度计算通过。

4.2 转轴强度

转轴材料采用 30CrNiMo8。为了加大齿轮传

动比,转轴采用内锥机构设计。优化转轴过渡位置退刀槽结构设计,以减小局部应力集中。在负载和转轴材料均确定的情况下,以降低内锥轴接合面应力水平为目标,通过对内锥轴的配合计算,选取最佳的结合面长度和配合锥度,内锥锥度比 1:20。

按照 DIN 7431-2000 标准对电机转轴进行静强度和疲劳强度校核计算^[17]。静强度计算结果表明,转轴在额定工况下的挠度为 0.71%,最大应力为 181 MPa,低于材料的许用应力强度 466.7 MPa;当逆变器突然短路时,会在电机上产生约 5 倍最大转矩的短路转矩,此时转轴的最大应力为 325 MPa,低于材料的最小抗拉强度 900 MPa。疲劳强度计算结果表明,短路工况下最危险截面的疲劳强度安全系数为 1.45 倍,大于 1.2 倍安全应用要求,转轴各截面均是安全的。

对电机内锥轴与小齿轮过盈联结进行计算,电机防滑安全系数 1.33,满足设计规范要求。电机内锥轴最大结合应力 293.5 MPa,小于材料许用应力强度 466.7 MPa,结合应力水平低于结构近似的和谐号大功率机车牵引电机。

5 轴承润滑结构及新型齿轮箱油路密封结构设计

5.1 轴承速度及润滑设计

滚动轴承的基本参数列表中给出的参考速度值符合 ISO 15312-2007 标准^[18]。该 ISO 标准制定的依据是油润滑轴承,但同样适用于脂润滑轴承。滚动轴承的参考速度是一种速度设计参考值,用来决定在一定的润滑剂黏度和工作负荷下,滚动轴承的允许最高工作速度,如需要超出参考转速工作,则必须验证在此工作转速下轴承工作温度及温升不会超出限值。组织进行牵引电机轴承润滑结构配置验证,对选择的 3 种润滑结构方案和 3 种润滑脂进行了对比测试,最终确定了最优的润滑结构、润滑脂、润滑脂填充量,并对确定的润滑结构、润滑脂填充量进行了空载温升、负载温升、模拟补脂等验证测试。根据轴承负载温升试验结果,在 46% 油脂填充空间下,牵引电机在最高转速 2 820 r/min 下传动端轴承 NU330 温升为 43.2 K,满足脂润滑轴承温升低于 55 K 的设计要求;气压平衡试验结果表明牵引电机大气平衡

孔保持微正压,有利于轴承的防尘。

通过对牵引电机传动端、非传动端轴承疲劳寿命的理论计算,传动端轴承综合计算寿命为 274 万 km,非传动端轴承综合计算寿命为 201 万 km,满足运行设计寿命要求。

5.2 新型齿轮箱油路密封结构

该项目牵引电机最高转速 2 820 r/min,传动齿轮高速旋转时,齿轮箱内形成正压压迫齿轮箱油向电机侧“窜”,如果回油不及时,将形成齿轮箱“漏油”“窜油”。该牵引电机采用新型油路密封结构,主要创新改进点:改进回油结构,实施分路回油,使回油更通畅;改进了挡油板结构,增加挡油板长度,并在挡油板尾部设计内倾小挡板,防止驱动系统反转时,齿轮箱油飞溅倒灌;增加挡胶结构,避免牵引电机与齿轮箱结合面密封胶涂抹过多,导致回油孔堵塞。如图 3 所示,交付的牵引电机经组装 10 套驱动单元在试验台进行驱动跑合试验,均没有发生漏油现象。已交付机车牵引电机在线运行良好,没有发生漏油现象。



图 3 驱动跑合试验

6 试验

6.1 地面试验

根据 IEC 603492-2010 对牵引电机进行例行及型式试验^[19-20],同时为了充分掌握双流制窄轨牵引电机的各项性能参数,在例行试验、型式试验、系统联调试验等传统试验项目的基础上,还对牵引电机样机进行了气压平衡试验、正弦波供电的 15、20、40 km/h 持续温升试验;10 min 短时定额试验、1 h 短时定额试验等多方位的性能测试。电机额定点持续温升曲线如图 4 所示。电机 10 min 短时定额温升曲线如图 5 所示。

图 4、图 5 中,D 代表牵引电机传动端,N 代表牵引电机非传动端,D 下代表传动端绕组下部,D 上代表传动端绕组上部,N 下代表非传动

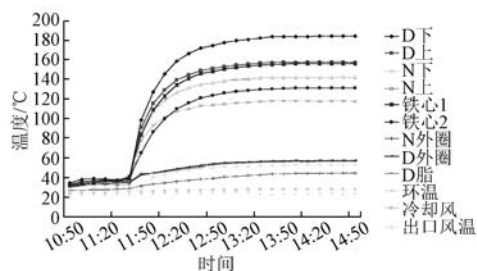


图 4 电机额定点持续温升曲线

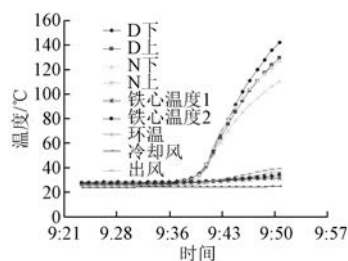


图 5 电机 10 min 短时定额温升曲线

端绕组下部,N 上代表非传动端绕组上部。牵引电机额定点正弦波供电持续温升为 138 K,电机额定点车载变流器供电持续温升为 166 K,满足定子绕组 200 K 温升限值的要求。在最大磁通下的空载电流的计算值与试验值相差 3.8%;在典型电压下的短路电流的计算值与试验值相差 3.4%。牵引电机 1 h 定额 820 kW,10 min 定额 973 kW。牵引电机各项试验结果满足设计要求,试验通过。

6.2 线路运行试验

牵引电机装车在南非现场进行线路运行试验,包括牵引特性试验、制动特性试验、线路振动试验、满载持续温升试验、长大坡道爬坡试验、过隧道试验。牵引电机额定速度下线路持续运行,定子绕组平均温升 143 K,传动端轴承温升 44 K,非传动端轴承温升 20 K,牵引电机各项测试结果符合设计预期,试验考核通过。

6.3 电机对比评定

选取几款南非市场主流窄轨机车牵引电机参数进行比较分析,如表 3 所示。

由表 3 可以看出,国产 YQ-775 牵引电机在单位质量发挥转矩、单位质量发挥功率方面已远优于国外同类产品的性能指标,达到国际领先水平。

表 3 南非市场主流窄轨机车牵引电机主要参数对比

参数名称	21E 机车	7E 机车	19E 机车
	YQ-775 电机	HS-1054- GR 电机	SEA-108 电机
制造商	中车电机	日立	西门子
额定功率/kW	775	500	750
额定力矩/(N·m)	7 805	5 177	7 309
额定转速/(r·min ⁻¹)	948	898	980
最高工作转速/(r·min ⁻¹)	2 820	2 597	2 635
起动转矩/(N·m)	9 537	7 765	8 372
电机质量/kg	2 050	2 900	2 400
单位质量转矩/ (N·m·kg ⁻¹)	3.80	1.78	3.05
单位质量功率/ (kW·kg ⁻¹)	0.378	0.172	0.313

7 结 语

本文的主要工作和研究成果如下:

(1) 开发了国内首款双流制窄轨电力机车用异步牵引电机,适用于窄轨铁路、3 kV 直流和 25 kV 交流双流制供电制式。

(2) 设计了高功率密度电磁结构、一体化抱轴结构、高强度复合焊接结构,解决了窄轨机车车下空间小、电机输出转矩大等技术难题。

(3) 设计了灌封式接线盒,解决了窄轨机车车下空间小、双流制供电制式下电压波动范围宽的技术难题。

(4) 设计了新型大尺寸轴承高转速脂润滑系统,解决了大尺寸轴承在脂润滑条件下高速运行问题。

(5) 设计了新型油路密封结构,解决了牵引电机与齿轮箱结合部漏油问题。

研制过程中也暴露出一些问题,比如对南非运行线路的振动条件和当地的气候条件调研不充分,特别是伴随着中国轨道交通装备的大量出口,牵引电机要适应世界各国的线路条件和环境条件,下一步将在牵引电机的环境适应性、抗振动、轻量化、通风系统优化设计等方面继续开展研究。

【参 考 文 献】

- [1] 杨浩,魏玉光.铁路重载运输[M].北京:北京交通大学出版社,2010.
- [2] 刘友梅.论电力牵引轨道交通的技术发展[J].电力

机车技术,2000,23(3): 1.

- [3] 张立伟,黄先进,游小杰,等.欧洲主力交流传动机车主牵引系统介绍[J].电工技术学报,2007,22(7): 186.
- [4] 成熹.一种窄轨内燃机车用牵引电动机设计[J].机车电传动,1995(5): 16.
- [5] 邓日江.和谐 HXD1 型机车用变频异步牵引电机[J].电力机车与城轨车辆,2007,30(1): 18.
- [6] 丰帆,郑国丽,黄鹏程,等.异步牵引电机冷却设计的分析与验证[J].电机与控制应用,2017,44(6): 63.
- [7] 胡桂林,吴顺海.货运电力机车用变频交流牵引电动机的开发[J].电力机车技术,2002,25(2): 8.
- [8] 黄国志,傅丰礼.中小旋转电机设计手册[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [9] 周黎民.城市轨道交通三相异步牵引电动机设计要点[J].电力机车技术,1999,22(4): 15.
- [10] 周黎民.鼠笼式变频调速异步牵引电机的计算程序[J].电力机车与城轨车辆,2006,29(3): 20.
- [11] 李益丰,高培庆,谷细凤.逆变器供电的异步牵引电机特性曲线的计算[J].机车电传动,1997(6): 8.
- [12] 李伟,韩力,李辉.逆变器供电异步牵引电动机电磁设计与特性计算[J].微特电机,2006,34(4): 14.
- [13] 陈伟华,黄国治.基于精确等值电路的异步电动机第二版电磁计算程序[J].中小型电机,1992,19(1): 2.
- [14] 陈红生,姜其斌.牵引电机 200 级绝缘系统国产化研究进展[J].电力机车与城轨车辆,2011,34(3): 1.
- [15] 陈红生,何恩广.机车变频三相异步牵引电机绝缘系统新思路[J].绝缘材料,2002(6): 32.
- [16] IEC. Railway applications-rolling stock equipment-shock and vibration tests: IEC 61373-2010 [S]. 2nd ed. Geneva: IEC, 2011.
- [17] DIN. Shafts and axles, calculation of load capacity-part 1: general basics: DIN 743.1-2000 [S]. Berlin: DIN, 2000.
- [18] ISO. Rolling bearings-thermal speed rating-calculation and coefficients: ISO 15312-2003 [S]. 2003.
- [19] 任志民,周西敏.对异步牵引电动机试验项目和试验方法的探讨[J].内燃机车,2000(4): 28.
- [20] IEC. Electric traction-rotating electrical machines for rail and road vehicles-part 2: electronic converter-fed alternating current motors: IEC 60349.2-2010 [S]. 2010.

收稿日期: 2019-09-30