

全封闭永磁同步牵引电动机冷却系统设计

何思源

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 永磁电机自身固有的特点以及用作牵引电动机时的高功率密度、高热负荷、轻量化、高可靠性的需求, 给永磁同步牵引电动机的冷却结构设计提出了高散热能力、高可靠性和良好工艺性的要求, 合理地设计冷却结构是发挥永磁同步牵引电动机优势的基本保障。文章阐述了永磁同步牵引电动机冷却系统的特点及设计方法, 并提出了降低永磁同步牵引电动机温升的措施。

关键词: 永磁电机; 全封闭牵引电动机; 冷却系统; 降低温升

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0048-06

Design of the Cooling System for Fully Enclosed Permanent Magnet Synchronous Traction Motor

HE Si-yuan

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Due to the inherent characteristics of permanent magnet motor and the requirements as a traction motor, the cooling structure of permanent magnet synchronous traction motor should meet the requirements of high cooling capacity, high reliability, light weight and good manufacturability. In order to ensure the reliable operation of permanent magnet synchronous traction motor, the cooling structure must be designed reasonably. This paper describes the cooling system features and design method of permanent magnet synchronous traction motor, and proposes the measures to reduce the temperature-rise of the motor.

Key words: permanent magnet motor; fully enclosed traction motor; cooling system; reducing temperature rise

0 引言

由于永磁体无需电流励磁, 电机损耗主要来源于定子^[1], 使得永磁同步牵引电动机采用全封闭结构成为可能; 同时为了防止灰尘、水分、酸碱等异物进入电机内部, 破坏永磁体, 尤其是为了防止轨道机车车辆运行时车轮与钢轨摩擦产生的金属粉末、制动时闸瓦磨损产生的大量闸瓦灰进入电机内部和吸附在永磁电机转子表面, 永磁同步牵引电动机通常要求采用全封闭结构, 且防护等级至少为 IP44。

电机采用全封闭结构, 可以提高其可靠性、减少维护工作量, 降低噪声, 但是由于电机内部的热量不能有效散出, 电机很容易成为一个等温体。电机内部热量在各部位间相互传导、对流和辐射, 其定子线圈端部温度、永磁体温度、轴承的温度都会很高, 尤其是高转矩密度、高功率密度和结构紧凑的电机, 比如, 采用直接驱动的永磁同步牵引电动机。

为了降低电机的温升, 除可以通过热管理法有效预测电机温度分布情况外^[2], 另一个有效的措施是选择合理的冷却方法, 即设计有效的冷却系统^[3]。本文介绍了轨道交通和电动汽车用全封闭永磁同步牵引电动机的冷却系统的设计方法, 并提出了降低电机温升的措施。

收稿日期: 2012-02-11

作者简介: 何思源(1970-), 女, 工程师, 主要从事永磁电机的研究与开发工作。

1 冷却方式的选择及温度控制限度

1.1 冷却方式的选择

全封闭永磁同步牵引电动机通常为高功率密度电机,一般采用风冷和液冷的冷却方式,包括强迫风冷、自扇风冷、机壳液冷和油内冷。图1~图4分别为各种冷却方式的典型结构。

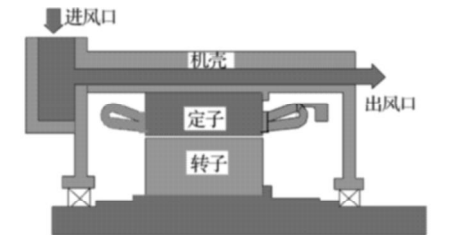


图1 全封闭强迫风冷的典型结构

Fig.1 Typical structure of fully enclosed forced air-cooling motor

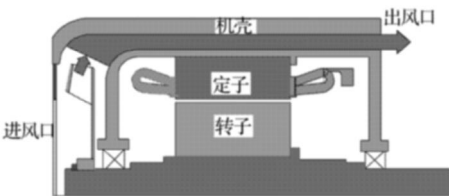


图2 全封闭自扇风冷的典型结构

Fig.2 Typical structure of fully enclosed fan-cooling motor

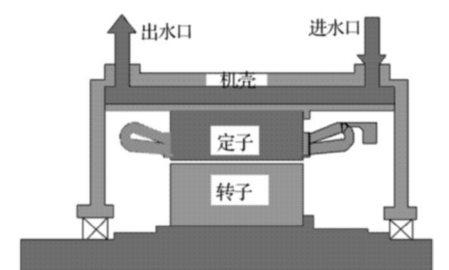


图3 机壳液冷的典型结构

Fig.3 Typical structure of ventilated frame water-cooled motor

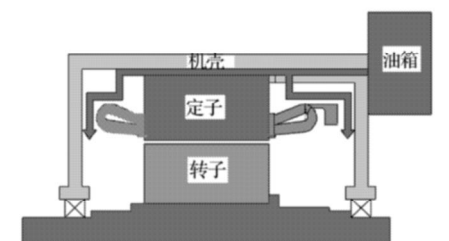


图4 油内冷的典型结构

Fig.4 Typical structure of inner oil-cooled motor

风冷的优点是结构简单,但冷却效果较差,一般只用于功率密度较低的电机,发热因数一般在3 500左右。

机车车辆用牵引电动机采用液冷方式的优点是:(1)热时间常数大,热过载性高;(2)无需空气过滤器;(3)无需牵引风道;(4)牵引电动机、逆变器和制动电阻可共用一个冷却回路;(5)附加损耗小,噪声低;(6)机车车辆可利用热损耗采暖^[4]。但该液冷系统比较复杂,同

样也存在缺点:(1)对冷却系统的密封性要求高;(2)需要解决金属腐蚀问题;(3)对电机运行条件和维护的要求高^[5];(4)电机的工作温度受到冷却液固化、汽化温度的限制。

机壳液冷方式一般用于高转矩密度的电机,比如直驱电机,发热因数一般控制在6 000以内^[3]。

油内冷冷却方式是利用齿轮箱的油,采用油浴或喷油的方式冷却电机端部、转子及轴承,冷却效果极好。但其系统复杂,需有专门的油泵系统,而且电机的密封也是一大难题。该冷却方式一般用于极高功率密度的电机,比如,丰田Prius电机以及REMY电机。

表1列举了几种冷却结构的冷却效果对比情况^[6]。

表1 各冷却结构冷却效果的对比

Tab.1 Cooling effect comparison of different structures

冷却介质	冷却方式	同体积的功率比较 / %
空气	外风冷	100
	外壳水冷	160
水	外壳水冷加端盖水冷	170
	外壳水冷加端盖水冷及轴水冷	175

1.2 温升限值

电机冷却方式和冷却结构的选择必须考虑以下部件的允许温升限制。

1.2.1 绝缘系统

在全封闭永磁电机中,定子绕组端部与机座间仅靠具有较高热阻的空气来冷却,温度分布极不均匀,呈现出两头高中间低的特点^[7]。绝缘系统温升限值除了应满足IEC60349-4规定的绝缘系统的温升限值外,还要求端部温度(电机最高热点)不超过绝缘所能承受的最高工作温度。

1.2.2 轴承

全封闭电机达到热稳定时,其内部各部件温升趋于一致,而牵引电机轴承自身高负荷、高转速产生的大量摩擦热,使得其运行温升非常高。一般情况下球轴承和滚子轴承的温度极限为130~150^[4]。

1.2.3 永磁体

永磁电机转子温度升高的主要原因是定子向内产生大量的辐射热。永磁牵引电动机通常采用的永磁材料为钕铁硼和钕钴,受材料配方及加工工艺限制,目前国内的磁性材料厂家推荐的高端钕铁硼的工作温度在200~260℃,钕钴工作温度可达250~500℃。具体的温度限值根据材料的牌号不同而异。

1.2.4 转轴及转子冲片

转子冲片一般采用带绝缘涂层的硅钢片,过高的工

作温度会损坏绝缘层,使电机铁耗增加;而转轴是电机主要承载部件之一,过高温度会损害其机械强度,产生有害的纵向膨胀。一般来说转子冲片的最高工作温度不应超过250℃,转轴的最高工作温度约为200℃^[4]。

2 液冷系统的设计

2.1 典型的水冷结构

液冷的永磁同步牵引电动机一般采用机壳外水冷的方式,电机机壳带有水道,内腔中的热量传导到机壳,再通过对流换热由水道中的冷却液带走,图5和图6分别为永磁同步牵引电动机的两种典型的水道排布方式。

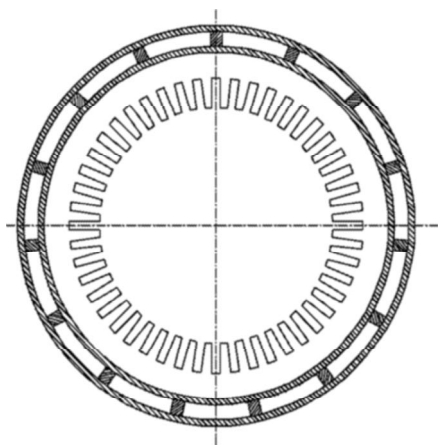


图5 均匀排布的冷却水道

Fig.5 Uniform-arranged cooling channels

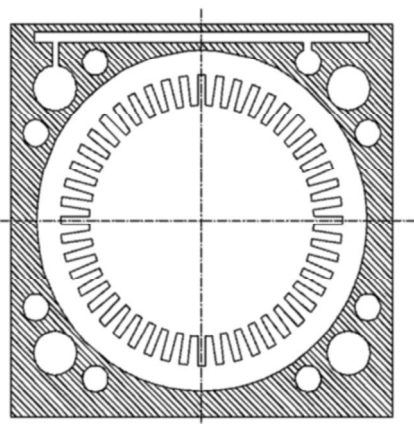


图6 四角排布的冷却水道

Fig.6 Cooling channels distributed in the four corners of the frame

其中图5所示均匀排布水道的冷却方式效果较好,但在外形尺寸相同的界限条件下,电机可用的有效体积较小。图6为只在4个角上排布水道的冷却方式,其冷却效果有限,但空间占用尺寸小,多用于功率较小,结构紧凑的电机。

从水路结构形式来看主要有螺旋式和轴向迂回式。螺旋式水路是指沿着电机机壳的圆周方向呈螺旋状分

布形成水路,冷却水沿着机壳的圆周表面呈螺旋形向轴向方向流动。一般来说,螺旋式水道沿机壳圆周方向贯通,空间转角大,流程长。其优点是水路平滑,水流阻力损失小,与机壳接触面积大,冷却效果好;其缺点是,出水口与入水口很难设计在电机的一端,水流从电机一端流向另一端温度升高,会产生温度梯度^[8]。

迂回式水路是指沿机壳表面有平行排布的水道,相邻两个水道中的水流成反方向迂回前进。其优点是,出水口与入水口较容易设计在电机的同一端,肋片面积大,散热效果好,加工工艺简单,散热均匀,在电机两端不会出现温度梯度;其缺点是,在电机中有许多转弯和倒角,流阻造成的压头损失较大,因此要求入口的水压较大。

2.2 冷却液流量的确定

冷却液的流量按下式计算^[7]。

$$\Sigma P_h = q_v \times C_a \times \Delta T \quad (1)$$

式中: ΣP_h ——需由冷却介质带走的损耗(kW);
 q_v ——冷却介质的体积流量(kg/s); C_a ——冷却介质的比热容(J/kg·K)(水的比热容一般取4200 J/kg·K);
 ΔT ——出、入口冷却液的温差(K)

2.3 水阻的计算

流体都具有粘滞性,管道对于流体存在着各种形式的阻力,包括直管阻力和局部阻力,不同的阻力有着不同的阻力系数。流体经过管道时通常会经过几种阻力,这些阻力根据水路结构形式串联或并联。

水路系统的总阻力一般可按按下式计算:

$$\Sigma h_f = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right) \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

式中: Σh_f ——水路系统总的阻力(J/kg); $\Sigma \xi$ ——水路阻力系数之和(流体流经管道所经过的所有阻力的阻力系数按照一定方式连接后的总和); l ——水路总长(mm); d ——当量直径(mm); λ ——相对摩擦系数; v ——冷却水流速(m/s)

2.4 水冷系统的设计要点

2.4.1 关键参数

2.4.1.1 冷却水流速

冷却水的流速 v 直接影响到流体的雷诺数和对流换热系数,流速太慢或太快都会影响水冷系统的散热能力,一般来说,冷却水的流速不应高于2 m/s。

$$v = \frac{q_v}{A} \quad (3)$$

式中: A ——水流截面积(mm²)

2.4.1.2 雷诺数

流体在管内的流动类型,可根据雷诺数 R_e 的大小

来判别, $R_e \leq 2300$ 时, 为层流; $R_e > 2300$ 时, 为湍流。不同的流体类型其流阻和对流换热系数的计算方法不同。一般工程应用中流体类型均为湍流, 其雷诺数 R_e 按下式计算:

$$R_e = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (4)$$

式中: μ ——流体的动力粘度(m^2/s); ρ ——液体的密度。

2.4.1.3 出、入水口的温差

由式(1)可知, 出、入水口温差 ΔT 的大小决定了电机冷却所需的冷却水总量, 同时还决定了下一级冷却系统的入口水温。

2.4.2 设计要点

(1) 根据机壳表热分布情况, 合理排水水道, 充分利用冷却水源, 避免冷却死角;

(2) 合理选择机座与铁心的配合公差, 充分考虑材料的热膨胀系数, 保证铁心外表面与机壳内表面的贴合度, 尤其是采用铸铝材质机壳时;

(3) 水道设计既要考虑所需的散热面积, 又要保证机座的机械强度;

(4) 可通过涂抹、喷涂、电镀、热镀、喷镀等方法在水道内腔表面形成保护层, 但不论采用哪种方法都要与水道制作工艺方法相匹配, 避免损伤保护层。

3 风冷系统设计

风冷系统因其结构较为简单, 广泛地应用在轨道交通和电动汽车牵引电动机领域。全封闭风冷结构的永磁电机一般采用自扇式(如Bombardier公司开发的Mitrac永磁牵引电动机)和强迫风冷式。

对于自扇风冷的全封闭结构, 其风扇设计难度大, 噪声问题凸显^[9], 并且在停车和低转速时无冷却风; 而强迫风冷受机车上车轮等其他部件形状位置的限制, 风道设计难度大, 风道形状复杂, 电机运行的可靠性受制于牵引通风系统的可靠性。因此, 永磁同步牵引电动机的全封闭风冷形式的选择需综合考虑各方面的限制条件, 进行优化选择。

3.1 风流量的确定

冷却风流量按式(1)计算, 其中空气的比热容一般取 $1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。

3.2 风压计算

电机的冷却风道一般都不长, 但形状复杂多变, 风阻较大, 尤其是风道的扩口、缩口、转弯以及出入口截面变化均会引起局部风阻。

冷却风需具有一定的压力才能保证一定流量的气

体能连续不断地通过具有风阻的风道, 此风压一般按下式计算:

$$\Delta P = z\zeta_l \quad (5)$$

式中: ΔP ——克服流阻所需的风压(Pa); z ——总流阻(murgue, $1\text{murgue}=1/\text{mm}^2$)。

3.3 风冷系统设计要点

3.3.1 风路设计

全封闭永磁同步牵引电机的径向、轴向都需独立于电机有效部分之外形成风道, 在保证必要的有效体积部分后所能用于风路设计的空间较小, 风道设计复杂。

冷却介质达到一定的流速才能满足电机散热所需的对流换热量。根据经验, 平均冷却风速可取 $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 。风量一定时, 电机内的风速取决于轴向通风孔的横截面积, 通风孔的设计一方面需保证磁通所要求的通路截面积, 另一方面在结构上还必须保证有足够的冷却表面积^[4]。同时轴向风道设计应尽量避免转弯和截面突变, 以减小流通阻力, 尤其要注意气流入口及出口处的风道形状设计, 避免因涡流而产生的高噪声问题。

3.3.2 风扇的设计

全封闭永磁同步牵引电动机的冷却风扇是一大设计难点。

机车车辆的系统环境要求全封闭牵引电机风扇的运行条件是: 压力高、体积流量较小、气流由轴向变到径向。因此, 通常选择离心式风扇比较合适^[10]。风扇所能产生的压力取决于叶轮轮缘速度 u_1 和 u_2 , 而经过风扇的气流量与叶轮外径处的圆柱表面积和叶片倾角有关。因此, 在设计冷却风扇时需要首先确定的关键参数是叶轮内外径 d_1 和 d_2 、叶片宽度 B 和叶片倾角 β , 其中叶轮外径 d_2 不仅关系到风压的大小, 还对风扇噪声有很大影响, 另外机车车辆通常需要可逆转, 故牵引电动机的冷却风扇一般不采用有倾角的叶片。

另一个需要重点关注的是叶片数量及其排布规则。一般来说, 离心风扇叶片的数目只需考虑叶片构成的气流通道的长、宽有合适的比例, 以减小损耗, 且具有足够的刚度即可^[7]; 但叶片的不均匀排布方法可使叶片旋转产生的周期性声压变化成为非周期性的, 可以离散周期性的声压噪声, 达到降噪效果。文献[9]中的实例电机采用非均匀叶片角度的风扇, 其所产生的噪声等级在所测量的全频率范围内大幅减小, 尤其是在某个频段, 噪声从 104 dB 降到了 95 dB 。

4 降低永磁同步牵引电动机温升的措施

全封闭永磁牵引电动机的高热负荷、低散热能力,

以及其气隙磁场谐波含量较大、定子磁场分布较复杂导致定子铁耗增大的特点,给解决永磁同步牵引电动机高温升的问题带来很大的困难。降低永磁同步牵引电动机的温升,除了按照上述规则来选择合适的冷却方式及设计合理的冷却系统外,还必须采用相应的措施来降低定子绕组端部、轴承部位和永磁体等部位的温升。

4.1 改善端部温升情况

永磁电机发热主要以定子损耗为主,线圈端部是电机温升最高的部位,降低端部温升对于改善全封闭永磁同步牵引电机的发热情况非常关键。

4.1.1 改善端部热传导

全封闭结构电机的定子绕组端部仅靠内部空气传导热量,空气的热阻高、传导慢,改善端部的热传导速率可有效降低端部温升。线圈端部采用导热胶灌封,在端部与机壳壁间建立热连接,以及在机壳内壁和端盖壁上增加散热筋以增加端部散热面积,这些措施均可改善端部热传导速率。

4.1.2 加强端部散热能力

4.1.2.1 端盖水冷

水冷电机在机座靠近端部的位置或端盖上设置并联水道,可加速带走端部传导到机壳和端盖壁的热量。

4.1.2.2 油内冷

如整车冷却环境允许采用油内冷的方法,端部喷油和端部浸润的方法可使线圈端部的热量直接传导到循环油中,冷却效果较好,比如丰田Prius的永磁同步牵引电机就是采用定子端部油内冷+水外冷的方法。

4.1.2.3 风冷内循环

全封闭风冷结构的电机可设计成带内风扇的双循环风路结构或带转子叶片的多循环风路结构,以改善端部散热情况;通过内循环均衡和改善电机内部温度场,以加快达到热稳定。

尤其是带内风扇的电机,其内风扇能有效阻止定子绕组向轴承辐射热量,同时转子冲片上增加轴向通风孔。一方面转子通风孔与内风扇形成一条电机内部空气循环通道,加快均衡内部温度场;另一方面增大转子铁心与永磁体之间的热阻,有利于保护永磁体;同时阻止热量向转轴及轴承辐射,降低轴承温升。

4.2 轴承冷却措施

由于全封闭电机达到热稳定时将成为一个等温体,降低轴承温升是提高电机可靠性必须解决的问题。

4.2.1 改善润滑条件,提高轴承耐温限值

轴承的耐温限值取决于轴承润滑脂的耐热性能,

选用温度极限高的复合型润滑油或脂,可以提高轴承的耐温限值。如日本300系和新型新干线列车用异步牵引电动机均采用复合锂基型润滑脂,轴承温升限值可以提高到80 K。

4.2.2 设计轴承隔热和散热结构

合理地设计结构,切断电机内部辐射热向轴承传导的路径,对于高热部位设置散热筋,或设置单独的冷却通道,加快热源对外部空气的热传导,同时可设置内风扇引导和加速内部热空气向有利于避免轴承温升的方向运动。

西日本铁路公司研制的235 kW全封闭永磁同步电机采用了独立冷却气腔的轴承散热优化方案(图7)^[2]。

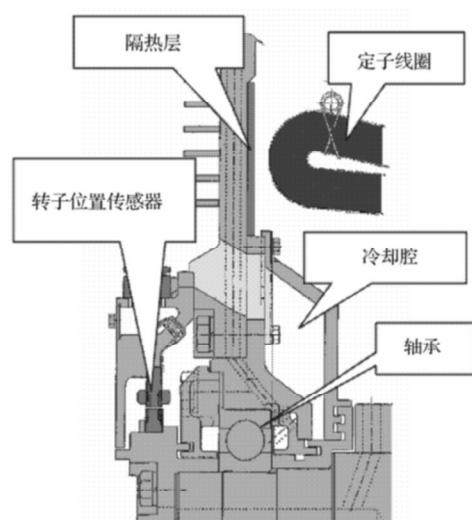


图7 235 kW 永磁同步牵引电机轴承散热优化方案

Fig.7 Optimized scheme of bearing cooling of 235 kW permanent magnet synchronous traction motor

4.3 降低永磁体的温升

由于电机定子槽开口引起的气隙磁导变化以及定子电流的时间和空间谐波,在永磁体内会感应出涡流^[11],特别是采用钕铁硼材料的内置式永磁同步电机,由于其较高的电导率和较低的耐温能力,以及内置式转子结构的散热条件较差,涡流损耗容易引起永磁体局部温升过高,导致局部失磁风险加大^[12]。

可从4个途径来减小涡流损耗,降低永磁体温升:

- (1)减小永磁体的厚度;
- (2)减小永磁材料的电导率;
- (3)减小气隙磁场中的谐波分量^[11];
- (4)永磁体进行轴向分段。

4.4 采用复合型冷却方式

西日本公司235 kW 永磁同步牵引电动机采用带冷却器的风冷结构,并设置专门冷却轴承的小风扇,解决高温升的问题。图8为采用复合型冷却方式的235 kW 永磁同步牵引电动机的轴剖面图。

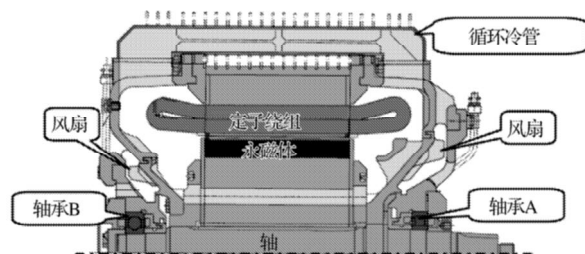


图8 西日本公司 235 kW 永磁同步牵引电动机轴剖面图^[2]
Fig.8 Profile view of permanent magnet traction motor (235 kW)
of West Japan Railway Cop.

5 结语

永磁同步牵引电动机的冷却结构既要满足牵引电动机的高功率密度、高热负荷、高可靠性要求,又需适合永磁电机固有的特点,因此其冷却结构设计应着重考虑以下几个方面:

(1) 永磁同步牵引电动机一般需要设计成全封闭结构,防护等级至少达到 IP44,以保证运行的可靠性。

(2) 根据电动车辆配备的冷却循环系统条件,永磁同步牵引电机可以采用液冷和全封闭的风冷的冷却方法,其中液冷的效果较好,全封闭的风冷有多种结构形式。

(3) 电动汽车电机一般采用水冷的冷却方案。采用水冷结构时,需着重考虑水道的设计与防腐。

(4) 风冷的全封闭永磁同步牵引电机的风道设计相对复杂,充分利用有限空间合理设计风道需依据较为精确的流体场和温度场仿真计算。

(5) 设计永磁同步牵引电机的冷却结构时,必须针

对其结构特点、内部热源分布及热传导特点采取相应措施来降低温升。

参考文献:

- [1] 柯以诺. 永磁同步电机传动系统在电动车辆上的应用[J]. 大功率变流技术, 2009(5): 31-37.
- [2] Kondo M. Totally Enclosed Permanent Magnet Synchronous Motor for Commuter Trains[J]. QR of RTRI 2005 46(2): 90-96.
- [3] Wallerand Faivre d Arcier Laurent Serillon. Thermal Modelling of Permanent Magnet Motor for Traction[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics 2007 XR-EE-EME, 2007.
- [4] Nieke H. 液体冷却的三相交流牵引电动机[J]. 变流技术与电力牵引, 2001(6): 34-36.
- [5] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [6] 康平, 穆大玉, 杨孝谦. 浅谈中型高压水冷隔爆型电机的结构设计[J]. 防爆电机, 1995(2): 10-12.
- [7] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [8] 李茂青. 小型水冷电机冷却系统设计与计算研究[J]. 科技资讯, 2010(13): 110-115.
- [9] Noda S. Development of Eco-friendly Totally Enclosed Fan Cooled Traction Motor[C]//Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, 2010: 21-24.
- [10] 维德曼 E, 克伦贝格尔 W. 电机结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [11] 周凤争, 沈建新, 林瑞光. 从电机设计的角度减少高速永磁电机转子涡流损耗[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(9): 1587-1591.
- [12] Dahaman Ishak Zhu Z Q David Howe Eday. Current Loss in the Rotor Magnets of Permanent-Magnet Brushless Machines Having a Fractional Number of Slots Per Pole[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2462-2469.

(上接第19页)

参考文献:

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动, 2010(5): 15-21.
- [2] 李江红, 马健, 彭辉水. 机车粘着控制的基本原理和方法[J]. 机车电传动, 2002(6): 4-8.
- [3] 彭辉水, 陈华国, 曾云, 等. 基于加速度微分粘着控制方法的仿真研究[J]. 机车电传动, 2010(2): 26-27.
- [4] 彭辉水, 李艳, 肖功彬, 等. 120 km/h 大功率交流传动内燃机

车的粘着控制[J]. 机车电传动, 2011(1): 4-5, 9.

- [5] 李江红, 胡照文, 陈华国, 等. HX₀1C 型大功率交流货运机车粘着控制的研究与应用[J]. 机车电传动, 2011(1): 1-3, 51.
- [6] 徐立恩, 陈华国, 曾云, 等. 广州地铁车辆国产化改造的粘着控制[J]. 机车电传动, 2008(6): 44-47.
- [7] 李江红, 陈华国, 胡照文, 等. 国产化北京地铁车辆的粘着控制[J]. 机车电传动, 2005(6): 40-42.
- [8] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.