

## 研究探讨

## 154T 矿用重型自卸卡车轮边牵引电动机研制

王 鑫<sup>1</sup> 胡晓明<sup>1</sup> 陈洪旭<sup>2</sup>

(1. 修配公司, 山西 永济 044502)

(2. 轨道交通电机产品开发部, 陕西 西安 710016)

**摘 要** 简述了 154T 矿用重型自卸车的电传动系统、机械传动系统, 重点介绍轮边电动机的研制过程, 包括电磁、机械计算, 结构设计、特性曲线和有限元分析, 为轮边电机开发探索了一条新路。

**关键词** 太阳轮 行星轮 电磁计算 特性曲线 有限元分析 失效分析

## 0 引言

矿用重型自卸车作为运输设备, 在国内外大型露天煤矿、铁矿、铜矿广泛应用, 如平朔安太堡露天煤矿、准格尔黑岱沟露天煤矿、鞍钢齐大山露天铁矿等, 典型代表是美国德莱赛公司的 154T630E 重型自卸车, 其作用主要是将挖掘出来的矿石从矿坑底部运输到地面, 每台卡车有两台 776 电动轮直流轮边电机作为动力源。

630E 卡车自上世纪 80 年代投入使用, 至今已经超过三十年, 卡车所带的两个 776 电动轮轮边电机已经接近寿命极限, 绝缘老化、环火、绕组匝短接地、断轴、太阳轮、行星轮打齿、断齿等故障频发, 严重影响卡车出勤率。我公司应某大型露天矿要求, 研制出 776 电动轮轮边电机的国产化替代品 ZDY5 直流轮边牵引电动机, 应用了高铁牵引电机的绝缘技术、试验技术、电磁技术、有限元分析、失效分析等, 大大提高了电动轮轮边电机的可靠性。

## 1 轮边牵引电动机基本工作原理

矿山广泛采用的是交-直流电力传动、整体车架、后卸式双轴电动轮自卸汽车, 它是大型露天矿山常用的一种主体高效运输设备。工作原理: 牵引运行时, 电动轮汽车的原动力来自车上的内燃机(大功率柴油机), 柴油机直接驱动一台同步主发电机, 将机械能转变成电能, 通过电力电缆将电力输送给牵引电动机(也称电动轮轮边电机), 它又将电能转变成机械能, 经轮边行星减速装置, 将机械动力传递给主动车轮, 驱动车辆运行。车辆的前进和后退是通过改变电动轮电机的磁场电流方向来实现的。车

辆在运行过程中, 可以进行动力制动, 即无摩擦的电制动方式。此时, 电动轮电机处于发电机运行状态, 将车辆运行的惯性动能转变成电能, 通过制动电阻栅, 以热能的形式耗散在大气中。这时, 电动轮电机产生的电动力矩阻碍车辆运行, 从而起到减速制动的作用。

电动轮总成是电动轮自卸汽车的直接驱动装置, 它由牵引电动机、轮边行星减速机构、扭力管和电动轮大轴承组成。牵引电动机的电枢驱动太阳齿轮, 将扭矩传递给三个大行星齿轮, 大行星齿轮与相应的三个小行星齿轮同轴, 三个小行星齿轮又驱动与扭力管固定为一体的内齿圈, 与轮边减速装置组成独立电动轮的电传动自卸汽车。如下图 1 所示:



图 1 154T630E 重型自卸车

2 电传动系统<sup>1</sup>

## 2.1 结构

整个车的动力来源为柴油发动机, 主要有美国的卡特发动机、康明斯发动机等几种型号。其装配的传动控制系统均为美国 GE 公司的配套装置, 有关发动机、发电机、电动轮, 整流控制柜等的布置示

意图如图 2:

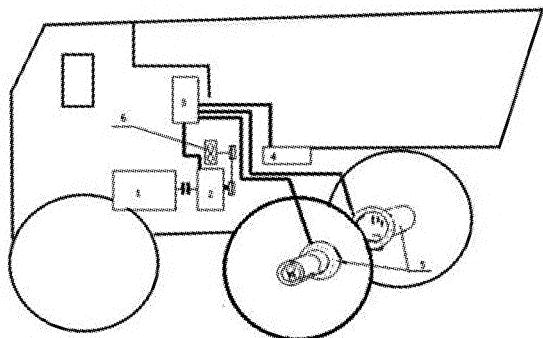


图 2 系统硬件布置示意图

- 1—发动机 2—同步发电机 3—整流及控制柜  
4—电阻制动柜 5—电动轮 6—风机

由图 2 可见,发动机-同步发电机组安装在司机室下方,维修时可整体由卡车前方出入,电动轮分别安装在翻斗下方左右两侧,司机室的后面是电气控制柜。实际上,在翻斗下方的中部还安装有液压系统,液压泵在中间,其两侧为油箱,液压系统主要是控制翻斗箱的起落。

卡车制停时,司机可通过脚踏板控制刹车盘,其安装在电动轮换向器端,同时也可借助电阻制动协助卡车制停。

卡车的快慢是司机通过脚踏板控制发动机油门,调节发动机转速,进而调节发电机电压,最终调节电动轮转速,进而间接控制车速。

## 2.2 电传动系统原理:

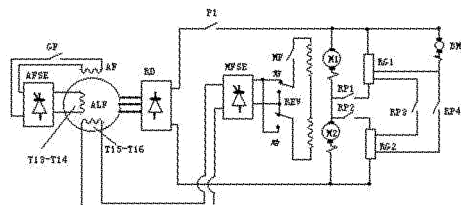


图 3 电传动系统原理图

- 其中:ALF—同步发电机 RD—不控整流桥  
AFSE—可控整流桥 MFSE—可控整流桥  
M1、M2—电动轮电机 BM—风机电机  
RG1、RG2—制动电阻 REV—方向开关

由图 3 可知,两个直流电动机为串联联接,其优点是:相对两台电机并联说,无论轮胎外径有偏差,还是两台电机特性有差别,均可得以补偿,使得两台电机的力矩接近,从而充分发挥牵引粘着力。当然,其缺点是易于发生空转,这需要通过灵敏的电子防空转进行检测预防。两个电动轮均为他励运转。发电机主绕组经过不控整流桥 RD 为电动轮主回路提

供电源。谐波绕组 T13-T14 经过单相可控整流桥 AFSE 整流后为自身励磁。谐波绕组 T15-T16 经过单相可控整桥 MFSE 整流后为电动轮他励绕组供电。卡车的前进后退,是通过操作开关 REV,改变电动轮两端电压方向,进而改变电动轮转向,最终达到控制卡车方向。

风机 BM 是在电阻制动工况下借助电阻箱的电压降运转,以冷却制动电阻,控制设计上与机车一样,也有延时继电器。

两个可控整流桥的控制信号来自电动轮转速、回路电流、过载信号等等,主要是一方面实现安全保护,另一方面实现电动轮恒功运行。

## 2.3 同步发电机、牵引电动机介绍

### 2.3.1 同步发电机

发电机型号为 GTA22,该电机是 5GT 系列(有 5GTA15、5GTA18、5GTA24 等等)电机中与众不同的一种发电机,其独特之处是采用 3 次谐波励磁。

该电机转子磁极为 T 尾固定装配,该电机定子有三套绕组,主绕组和两套辅助绕组。

主绕组为双层迭绕组,辅助绕组采用 3 次谐波绕组,绕组为单层绕组。每组谐波绕组由 32 根槽导体串联而成,槽导体采用罗贝尔线棒绕成(即换位线圈),这主要是用以解决高频电流产生的集肤效应,通过槽内导线换位使导线中的环流得以削弱,减少损耗。采用谐波绕组的好处是:省掉一台励磁机,可节省空间,降低制造成本,同时减少了维修量;其次,就整流方式提供直流电源而言,相对的直流脉动量很小;另外,利用可控整流桥可方便的实现各种控制需求。

### 2.3.2 电动轮牵引电机

ZDY5 直流牵引电动机是我公司国产化研制的一种采取强迫通风的四极他励直流牵引电动机,电动轮机架为圆形焊接结构,它既是电机磁路的一部分,又是电机的主要结构部件。电枢由转轴、电枢线圈、换向器组成,转轴为两端花键传动,后面章节会详细介绍,在此不再赘述。

## 3 机械传动系统

如图 4、图 5 所示,电动轮转子为双轴伸,传动端套有太阳轮,换向器端套有制动盘,其联接方式均为花键联接。电动轮的转子通过太阳轮啮合行星大齿轮,行星大齿轮与行星小齿轮为同轴装配,如图 6,行星小齿轮啮合扭力管(为内齿圈),扭力管与轮毂为螺钉联接,这样,轮毂就带动轮胎转动,轮毂通过轮毂轴承装配在机座外周,机座通过螺钉 8 与车

盘7联接。电动轮机座固定到翻斗箱下部的车盘上后,呈悬臂梁结构。

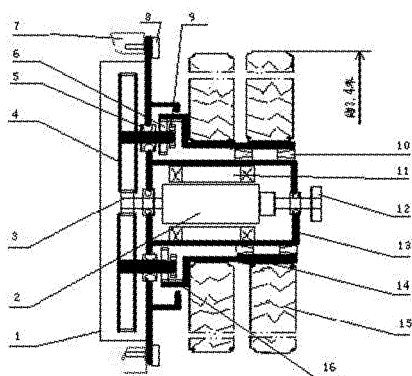


图4 机械传动系统结构图

- 1—齿轮罩 2—转子 3—太阳轮  
4—行星大齿轮 5—轴承 6—行星小齿轮  
7—车盘 8—螺钉 9—轴承 10—轮毂轴承  
11—磁极装配 12—制动盘 13—机座  
14—轮毂 15—轮胎 16—扭力管

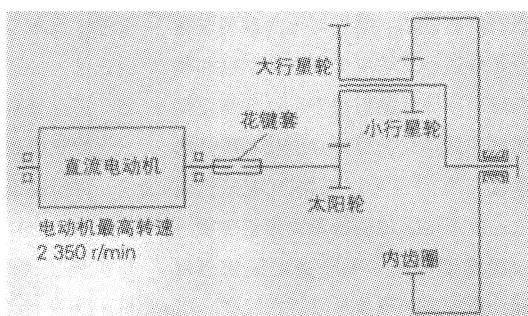


图5 机械传动原理图<sup>[2]</sup>

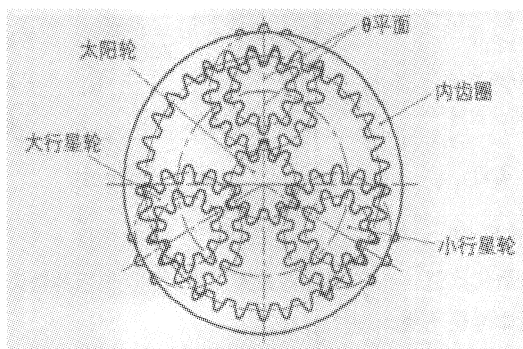


图6 NW 系行星轮系减速结构<sup>[2]</sup>

## 4 轮边牵引电动机研制

### 4.1 结构介绍

ZDY5 电动轮电机是采取强迫通风的四极他励直流牵引电动机,电动轮机架为圆形焊接结构,它既是电机磁路的一部分,又是电机的主要结构部件。在机座换向器端有观察窗孔,以便更换电刷,维护保

养换向器和刷架。

电机图片如图7、图8、图9,电机结构如图10。

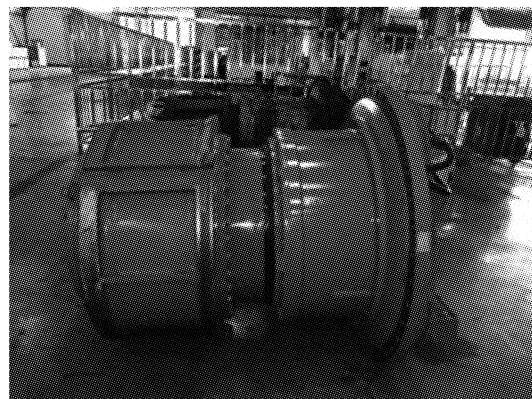


图7 ZDY5 电动轮轮边电机

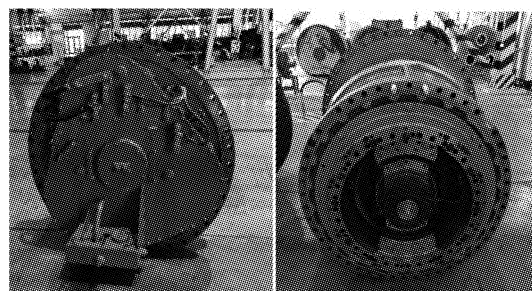


图8 ZDY5 电动轮轮边电机两端结构

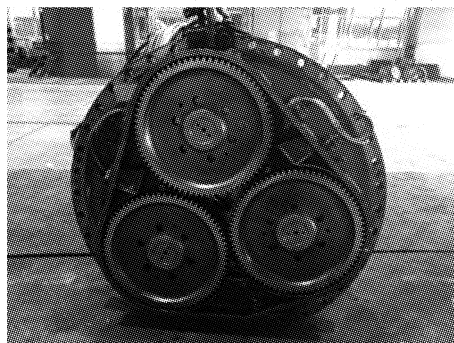


图9 ZDY5 电动轮轮边电机行星轮系减速结构

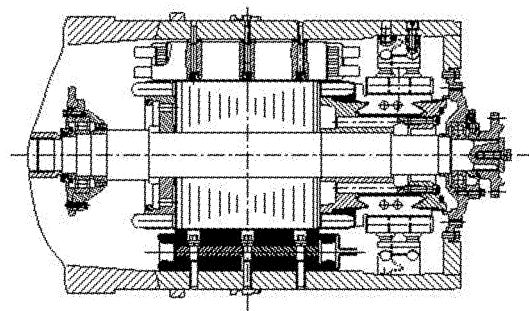


图10 电机结构

#### 4.1.1 定子

定子部分有四个主极和四个附极,四个主极内部串联,引出两根线S、SSX,四个附极内部串联,再

与电枢串联,引出两根线 A、AA,主附极分别用螺栓固定在机架上,为避免油水进入电机内部,机座磁极螺栓沉头孔用腻子密封。

主极线圈扁绕结构,线圈为整体压型结构。附极线圈为扁绕结构,主极铁芯为叠片结构,主极铁芯与电枢铁芯之间的气隙采用非圆曲线型气隙,改善换向。附极铁芯为整块结构。为保证主、附极线圈在运用中不发生松动,在线圈与铁芯的直线部分,用适形毡填满,两端用绝缘块塞紧,整体浸漆处理,这样就使线圈与铁芯和机座形成一个整体,提高了电机的可靠性。

#### 4.1.2 电枢

电枢冲片采用 0.02in 厚的优质冷轧硅钢片压制。电枢共有 50 个槽,电枢绕组为单叠绕组,每个线圈有 3 个元件。元件的导线采用聚酰亚胺薄膜绕包线,元件在槽内的排列为同槽竖放。均压线为双丝聚酰亚胺漆包线。

换向器为燕尾拱形结构,共有 150 片换向片和云母片。换向器压圈上 V 形云母环伸出部分粘有聚四氟乙烯保护带,保证换向器有良好的耐电弧能力和密封防潮性。在制造中采用了动压、超速工艺使换向器的成型更加稳定。

电枢线圈和均压线的线头与换向器升高片采用了 TIG 焊接,使焊接处具有良好的机械性能和电气性能。

电枢制造中采用了嵌线后钢丝予扎,加塞填充泥和真空压力浸漆等工艺,大大提高了电枢的整体性、密封性和可靠性。

#### 4.1.3 刷架系统

电机的刷架系统有四个刷握,每个刷握是通过一个粗壮的刷杆固定在机座上,为提高耐电弧性能,刷杆外面套有聚四氟乙烯管。每个刷握有三块电刷,电刷牌号为 T825,每个电刷尺寸为 3/4" (厚) × 2 - 1/4" (宽) × 2" (长),刷握弹簧采用圆柱形螺旋压簧。

#### 4.1.4 端盖

电机传动端、换向器端各装有一个轴承,其型号分别为 FAGNU224 - E - M1 - C3、FAG6318 - C3,可以从换向器端观察电机换向情况。电机有四根引出线,如图 11 所示。

### 4.2 性能指标

#### 4.2.1 电机基本参数

型号:ZDY5

额定功率:535kW

额定电压:580/850V

额定电流:935/630A

额定转速:1306 / 1831r/min

最大转速:2350r/min

额定效率:92%

励磁方式:他励

励磁电压:10V

励磁电流:130A

绝缘等级:H/H

工作制: S1

冷却方式:强迫通风

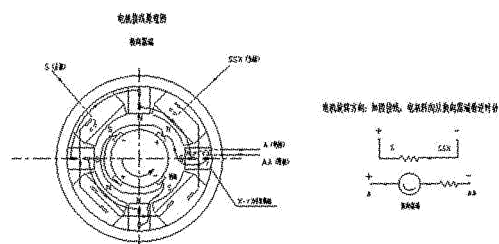


图 11 轮边电机接线原理图

各线头标志如下:

A——电枢首端

AA——附极绕组末端

S——主极绕组首端

SSX——主极绕组末端

换向器端装有速度传感器,到测速齿盘距离 0.010" ~ 0.034"

#### 4.2.2 特性曲线

##### 4.2.2.1 空载特性曲线,如图 12 所示:

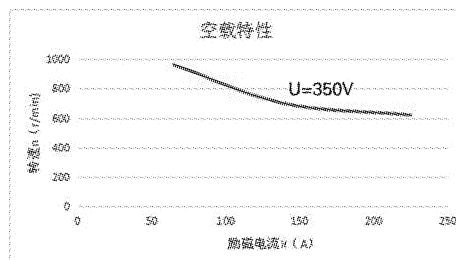


图 12 空载特性曲线

##### 4.2.2.2 负载特性曲线,如图 13 所示:

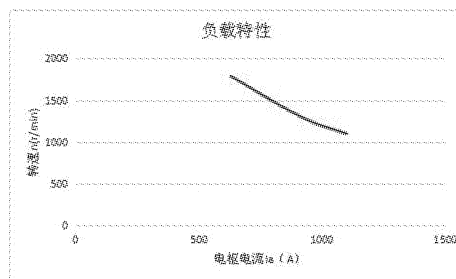


图 13 负载特性曲线

### 4.3 主要研究内容

#### 4.3.1 电机产品的技术参数、安装接口、性能研究

本电机研发属于进口产品国产化替代项目。因

此,保证电机产品的参数、安装接口与原型电机高度一致、螺纹采用美制,电机性能指标完全满足使用需求,保证电机产品与原型电机实现互换是电机研发的首要任务。

为了尽可能获取原型电机的技术参数,我们查阅了 GE 原版英文自卸车产品手册数百页。GE 系列产品繁多,对具体的结构参数,我们往往需要反复的比对、筛选、辨识出所需的准确信息。为了保证安装接口,我们采取了样件现场测绘、高精度三坐标测量、与有限的图纸资料比对等多种方式,实现了安装接口与原型电机的高度一致。对电机性能至关重要的速率特性、转矩特性,我们采取了计算与试验结合的方式,设计阶段进行电磁计算、电机组装后进行试验检测并与计算结果相验证,然后与原型电机相比对,确保优于原型电机。

#### 4.3.2 电机产品的适应性、安全性、稳定性研究

矿山用自卸车牵引电机有其特殊的使用环境和运行工况,设计制造时,必须予以足够重视。

(1) 矿用自卸车通常运行于干燥、多金属粉尘的环境中,这就要求牵引电机具有良好的绝缘性能、要求电机风路畅通、对电机通风散热要求比较高;

(2) 自卸车运行路面坑洼不平、坡道多,造成电机运行常有过载、起动频繁等恶劣工况,并伴有剧烈的冲击振动。这就要求电机具有一定的容量冗余、还必须具备抗冲击能力。

针对以上恶劣运行工况,为保证电机安全、稳定、可靠运行,我们在电机设计和制造过程中采取以下措施:

(1) 电机设计时,选取合适的电磁参数、选取性能优良的硅钢片,保证电磁参数不过于饱和;

(2) 电机的内部结构、风道风路方面,包括内部油管、固定卡夹等,采用原型电机结构不变,保持电机内部风阻不变,保证电机的通风散热性能;

(3) 对影响电机安全、可靠性的关键部件和材料,如轴承、传感器、橡胶密封圈、电刷等,选用、采购原装件;

(4) 对电机关键部件进行安全验算,保证安全系数。

#### 4.3.3 对原型电机进行适度技术创新改造

原型电机产品为 GE 公司上世纪 80 年代研发的直流电机产品,随着现代新技术的发展,新材料、新工艺不断涌现,原型电机已经显得技术过于陈旧,我们进行了部分技术改造。主要在以下两个方面:

(1) 电机绝缘结构和绝缘材料的选取和使用

电机绝缘性能的优劣直接影响电机容量发挥和安全稳定运行,原型电机采用的绝缘结构和材料过

于厚重。本次电机设计时,我们借鉴公司轨道交通电机产品技术,采用成熟的绝缘结构、选用最优的绝缘材料,既保证了电机绝缘强度,又减薄了绝缘层厚度,更利于电机散热,提升了电机整体性能。

#### (2) 电机内部磁极联线化繁为简

原型电机磁极联线存在以下弊端:磁极引线头多、联线多且不规则,需要专门制做、整形和绝缘处理;内部联线复杂,不仅使定装工艺复杂,而且联线之间互相挤压,容易造成匝短。

我们采用公司同类电机的成熟技术,对以上弊端进行提升改进:在保证电机对外接线、性能不受影响前提下,减少磁极引线头数量,使联线简单规范化,将原有的四个主极线圈两两串联、四根引出线外部再串联的连线方式,改为四个主极线圈内部串联,仅两根引出线的连线方式。既简化了结构,方便生产操作,又减少了匝短故障风险,如图 14 所示。

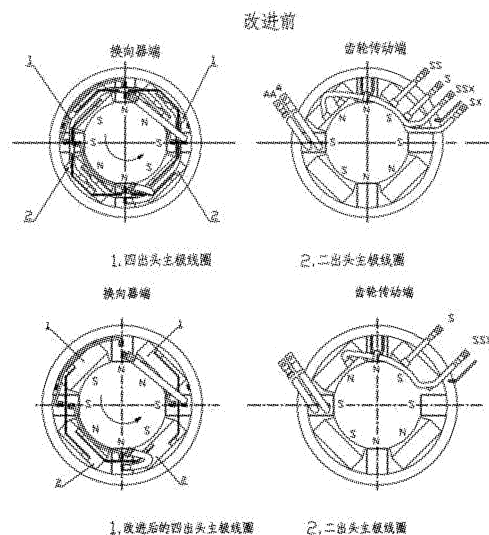


图 14 定子连线改进前后对比图

## 5 技术难点

本电机虽说是进口产品国产化项目,有样机可提供一定的参照。但在设计制造过程中,还是存在不少技术难题,我们努力克服了以下难点:

### 5.1 机座圆形结构,太阳轮、三个行星轮孔的加工与检测

电机的机座不仅是电机单纯意义上的机械结构支撑和磁路组成部分,它还是电动轮总成的机架,兼具与行星齿轮的对接安装。因此,其结构复杂、加工难度大、精度要求高。这对于电机制造来说,增加了组装对接的难度,因定子磁极、刷握定位块、端盖、轴承盖的安装均需与其准确定位安装。我们采用设计阶段双方多次图纸确认沟通、加工和组装前反复三

坐标检测等措施,保证了双方部件的完美对接。

### 5.2 电机经常过载,要求过载能力 200%,对电机换向的计算与分析

在直流电机中,换向过程是一个很重要的问题。特别是本机电压高、转矩大、电流大,转速快,过载能力要求高,这都给电机的换向增添了难度。设计过程中,我们采用经典的换向理论,对影响电机换向性能的重要指标进行了计算,即换向区域宽度占极间中心区域宽度的比列、换向片间平均电压、换向元件中的电抗电势等,借鉴了铁路牵引电机的换向计算经验、并通过试验验证,采用这些措施保证了电机换向性能优良。因技术保密需要,仅对换向计算过程部分截图,如图 15 所示。

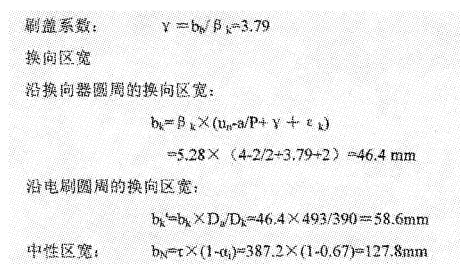


图 15 换向区计算

### 5.3 换向器的有限元分析与机械强度计算

电机换向器直径较大,转速较高,对换向器的装配性能要求较高。我们对换向器组件及装配性能进行了有限元分析和计算,确保换向器的安全稳定性。以下是换向器装配结构示意图和部分计算截图,如图 16、并对换向器套筒进行了有限元分析,如图 17。

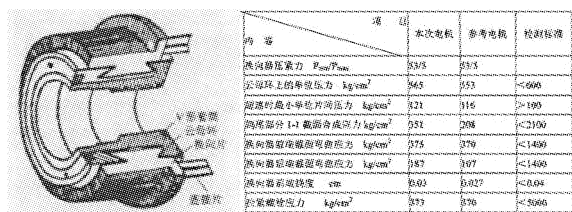


图 16 换向器强度计算

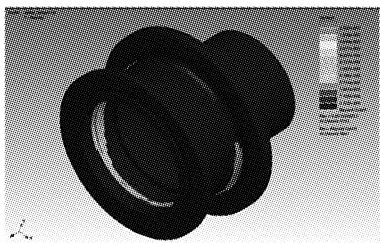


图 17 换向器套筒有限元分析

#### 5.4 电机转轴的机械计算、校核和优化

转轴是电机中最重要的零件之一。其损坏大多具有疲劳性质,我们对电机转轴的刚度、强度进行了

计算,严把材料选择关,保证转轴长期运行安全可靠。电机转子由轴承支撑,轴承间具有一定长度。这样,作用于该段轴长度上的各种力将使转轴产生挠度。它将使气隙不均匀度加大,从而增大单边磁拉力,这又会进一步增加轴的挠度,严重时会导致定、转子相擦。因此,我们重点对转轴进行了挠度计算。图 18 是电机转轴示意图和挠度计算部分截图。

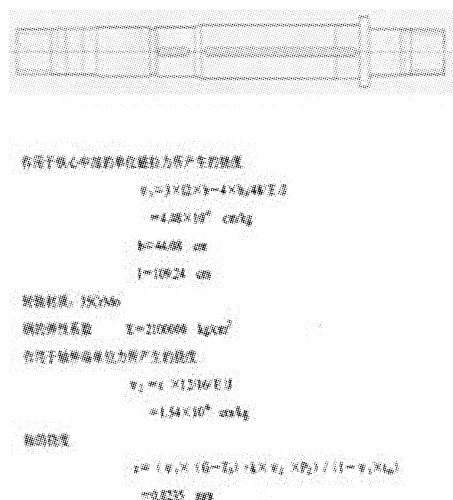


图 18 转轴强度计算

### 5.5 其它一些高速旋转件的安全性能计算和分析

(1) 电枢槽楔应力计算,如图 19。

(2)电枢端部绑扎应力计算,如图 20。

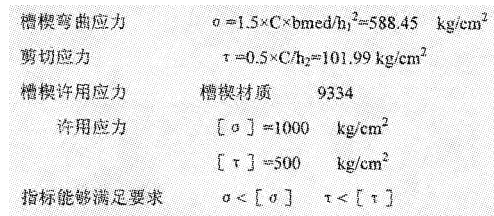


图 19 槽楔强度计算

|                    |                                                                          |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 前端线圈总重             | $G_1=(g_1+g_2) \times L_1 \times Z/2=40.5 \text{ kg}$                    |
| 后端部线圈总重            | $G_2=(g_1+g_2) \times L_2 \times Z/2=16.95 \text{ kg}$                   |
| 绕组重心半径             | $D_0=D_r-h_0=44.93 \text{ cm}$                                           |
| 前端绕组离心力在无纬带中产生的拉力  | $P_1=0.89 \times G_1 \times D_0 \times (n_p/1000)^2=14580.98 \text{ kg}$ |
| 后端部绕组离心力在无纬带中产生的拉力 | $P_2=0.89 \times G_2 \times D_0 \times (n_p/1000)^2=6099.19 \text{ kg}$  |
| 前端无纬带总截面           | $F_1=\delta \times b_1 \times 10^{-2}=6.655 \text{ cm}^2$                |
| 后端无纬带总截面           | $F_2=\delta \times b_2 \times 10^{-2}=5.94 \text{ cm}^2$                 |
| 无纬带本身离心力所产生的应力     | $\sigma_0=\sqrt{9810 \times V_{p2}}=122.3 \text{ kg/cm}^2$               |
| 无纬纬带应力 前端          | $\sigma_1=P_1/F_1+\sigma_0=2313.2 \text{ kg/cm}^2$                       |
| 后端                 | $\sigma_2=P_2/F_2+\sigma_0=1149.1 \text{ kg/cm}^2$                       |

图 20 电枢绑扎力计算

通过以上一些计算和分析,确保电机产品运行安全、可靠。

## 6 结语

通过上述分析、设计、计算,我公司研制的 ZDY5 电动轮完全能够满足矿方要求,首批两台已经于 2018 年 8 月在煤矿投入使用,运行良好,完全替代原产品,可靠性大幅提升,630E 卡车的出勤率大幅提高,故障率显著下降,得到矿方好评。该轮边电机的研制成功,为轮边电机设计开发探索了一条新路,供广大技术人员参考。

#### 参考文献

- [1] 雷王宏. 电动车轮毂电机及其电传动系统简析《电传动技术》2000 年第 3 期.
- [2] 杨钟胜. GE788 电动轮自卸车轮边减速器 NW 行星轮系减速机构的综合评述《汽车工艺与材料》2018 年第 11 期.