

永磁同步减速电机在矿井提升机上的应用

邱战峰¹ 盛超² 李凌云³ 苗向民³ 李斌成³

1 洛阳九亿重工集团有限公司, 河南 洛阳 471003

2 舜华电气(昆山)有限公司, 山东 曲阜 273100

3 华亭煤业集团新窑煤矿有限责任公司, 甘肃 凉州 744201

[摘要]针对低速永磁同步电机直驱型矿井提升机体积大、成本高、电机运输困难、难以大范围推广等缺点, 我们研发了一种永磁同步减速电机直驱型矿井提升机。永磁同步减速电机具有低速永磁同步电机直驱型矿井提升机效率高、节能效果明显、启动转矩大等几乎所有的优点, 同时又具有铜损更低、调速范围宽、投资成本低等独有优势, 使用户现场使用得以验证。

[关键词] 矿井提升机; 永磁同步电机; 永磁同步减速电机; 节能; 投资成本

DOI: 10.33142/ec.v6i12.10357

中图分类号: TN773

文献标识码: A

Application of Permanent Magnet Synchronous Reduction Motor in Mine Hoists

QIU Zhanfeng¹, SHENG Chao², LI Lingyun³, MIAO Xiangmin³, LI Bincheng³

1 Luoyang Jiuyi Group Mining Machinery Co., Ltd., Luoyang, He'nan, 471003, China

2 Shunhua Electric (Kunshan) Co., Ltd., Qufu, Shandong, 273100, China

3 Huating Coal Group Xinyao Coal Mine Co., Ltd., Liangzhou, Gansu, 744201, China

Abstract: In response to the drawbacks of large volume, high cost, difficult motor transportation, and difficulty in large-scale promotion of low-speed permanent magnet synchronous motor direct drive mine hoists, we have developed a permanent magnet synchronous reduction motor direct drive mine hoist. The permanent magnet synchronous reduction motor has almost all the advantages of a low-speed permanent magnet synchronous motor direct drive mine hoist, such as high efficiency, obvious energy-saving effect, and large starting torque. At the same time, it also has unique advantages such as lower copper loss, wide speed range, and low investment cost, which have been verified by user on-site use.

Keywords: mine hoists; permanent magnet synchronous motor; permanent magnet synchronous reduction motor; energy-saving; investment cost

引言

作为矿山井上和井下的“交通要塞”, 矿井提升机是运送矿山物料、机械设备和操作人员的关键设备。近年来, 国家大力提倡节能降耗, 发展绿色经济, 被大众誉为“碳中和电机”的永磁同步电机越来越受到人们重视。永磁同步电机在矿井提升机领域的使用, 不仅节能收益非常可观, 而且具有启动力矩大、低速特性好等优点。传统永磁提升机采用低速永磁同步电机直驱矿井提升机结构, 虽具有永磁电机的几乎所有优点, 但也因其成本高、体积大、运输困难等原因使得大功率低速永磁同步电机很难在矿井提升机上大范围推广使用。为此, 我们研发了一种体积相对较小、成本较低的大功率永磁同步减速电机。

1 永磁同步减速电机结构

永磁同步减速电机, 包括一级行星减速器和永磁同步电机。一级行星减速器无需输入轴, 结构包括减速器机盖、行星齿轮结构、输出轴, 减速器机盖和永磁电机壳体采用螺栓连接, 太阳轮和输出轴通过设置在减速器机盖内的行星齿轮结构连接; 永磁同步电机包括电机前端盖、电机壳体、电机后端盖、转子和定子, 编码器连接装置, 电机壳

体设置在电机前端盖和电机后端盖之间, 定子和转子设置在电机壳体内; 减速器机盖与电机前端盖连接, 减速器太阳轮和电机转子通过花键连接。

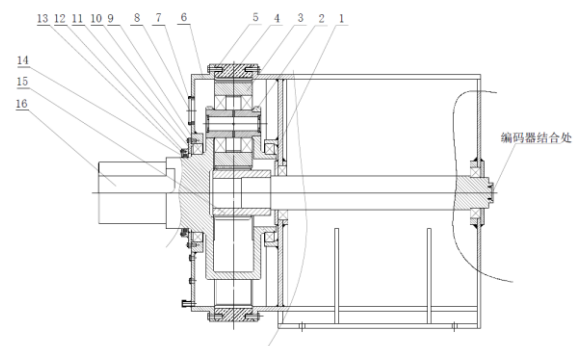


图1 永磁同步减速电机结构示意图

1-轴用弹性挡圈, 2-减速器转架, 3-行星轮, 4-内齿圈, 5-螺栓, 6-减速器机盖, 7-螺栓, 8-观察孔盖, 9-轴承, 10-螺栓, 11-透盖, 12-压板, 13-螺栓, 14-油封, 15-太阳轮, 16-切向键

永磁电机输出轴延伸到减速器太阳轮内, 减速器转架和永磁电机前端盖之间设置有轴承, 轴承通过固定在永磁

电机前端盖和电机输出轴上弹性挡圈密封。

减速器输出轴延伸出减速器机盖,输出轴和减速器机盖之间设置有轴承,轴承通过固定在减速器机盖上的前轴承透盖和压板密封。

减速器机盖前端设置有观察孔盖,透过观察孔盖能观察清楚减速器内部润滑油的状态。

减速器输出轴带切向键和齿轮联轴器,永磁同步减速电机通过齿轮联轴器与矿井提升机主轴装置(卷筒)连接。

电机转子的两端分别通过轴承固定在电机前端盖和电机后端盖上,转子位于定子内的部位设置有永磁体,转子伸出电机后端盖处留有和光电编码器连接的接口。定子上分布有三相绕组,通入三相交流电后就会形成旋转磁场,和转子上固定磁极的永磁体互相作用产生磁力转矩,从而带动转子进行旋转,转子的旋转速度最终与定子中产生的旋转磁场的转速相等。

永磁同步减速电动机设置有冷却管路,电动机传动系统也可采用水冷方式强制冷却。省去了传统矿井提升机为行星减速器专设的润滑站装置,更节约了成本,减少了设备占地空间,更避免了润滑站的噪声污染。

2 永磁同步减速电动机直驱型矿井提升机

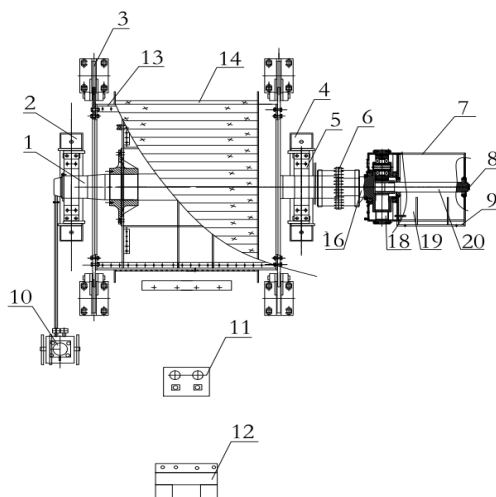


图2 永磁同步减速电动机直驱矿井提升机的俯视结构示意图

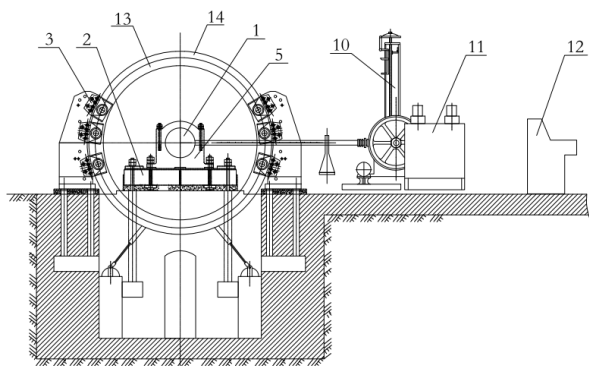


图3 永磁同步减速电动机直驱矿井提升机的左侧视结构示意图

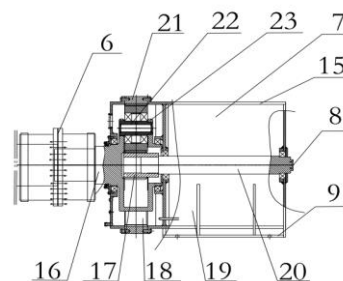


图4 永磁同步减速电动机结构示意图

图2中标记:1、主轴;2、左轴承梁;3、盘形制动器;4、右轴承梁;5、轴承座;6、齿轮联轴器;7、永磁同步减速电动机;8、编码器接口;9、电机底座;10、深度指示器;11、液压站;12、操纵台;13、卷筒;14、卷筒塑料衬板;15、电机壳体;16、输出轴;17、太阳轮;18、行星减速器;19、永磁同步电机;20、转子;21、内齿圈;22、行星轮;23、减速器转架。

如图2、图4所示,永磁同步减速电动机直驱矿井提升机,包括主轴装置,主轴装置的主轴两端分别设置有轴承,轴承外部分别设置有轴承座,轴承座分别固定设置在左轴承梁和右轴承梁的上部位置,在主轴的左端连接有深度指示器,主轴的右端通过齿轮联轴器和永磁同步减速电动机输出轴连接,永磁同步减速电动机转子右端设置有编码器接口;主轴装置还包括以主轴为中心沿其轴向外部设置的卷筒,环绕卷筒的外缘面上设置有卷筒塑料衬板,卷筒的两端分别连接有盘形制动器,盘形制动器分别连通液压站,主轴装置的卷筒还设置有定车装置,永磁同步减速电动机右侧下部位置设置有电机底座。

这种永磁同步减速电动机驱动矿井提升机以永磁同步减速电动机为动力源,通过齿轮联轴器、主轴装置构成了高效的传动系统和工作机构,其中主轴装置和主轴承的主要作用是缠绕或搭挂提升机钢丝绳,承受各种正常载荷(包括固定载荷和工作载荷)及各种紧急事故情况下所造成的非常载荷,并将此载荷经过轴承传给基础;传动系统包括齿轮联轴器和永磁同步减速电动机,永磁同步减速电动机7的作用是传递动力,永磁同步减速电动机7中的行星减速器要有足够的强度和刚度,并应能适应各种电动机转速的速比;永磁同步减速电动机输出轴带切向键,永磁同步减速电动机通过齿轮联轴器与矿井提升机主轴装置(卷筒)连接,联轴器的作用是联接两个旋转运动的部分,并通过其传递动力,它具有足够的强度和刚度,而且联接方便,允许被连接件之间有一定的相对安装和运动误差,并有一定的弹性及缓冲性。

由液压站、制动器装置和液压管路构成了可靠的安全制动系统,用于实现提升机正常工作制动及故障状态下的紧急制动的控制,在紧急制动时,实现二级制动来保证提升机的安全,在提升机停车时能可靠地抱闸;在减速阶段

及重物下放时,能参与提升机速度控制;在安全保护起作用或紧急事故情况下使提升机迅速停车,以免事故发生或扩大;对双筒提升机,在调节绳长或更换水平时,应能抱闸游动卷筒,松开固定卷筒;矿井提升机制动系统的控制装置是液压站,盘型制动器 3 由液压和电气控制进行制动,控制装置的作用是:调节制动力矩;在任何事故状态下安全制动(紧急制动);为双筒提升机调绳装置提供调绳离合器油缸所需的压力油。

由深度指示器、深度指示器传动装置和操纵台、电气控制设备构成了完备的观测操纵系统,深度指示器采用目前常用的传动装置为牌坊式传动装置;深度指示器的主要作用是:为操作者(提升机司机)指示提升容器在井筒中的位置;向电气控制系统发送减速、过卷、停车等信号;在进入减速段运行时,对提升机提供限速保护;当需要解除二级制动时,向电控系统发送二级制动解除信号;操纵台的作用是:操纵台上装有各种手把和开关,是操作提升机完成提升、下放及各种动作的操纵装置;操纵台上装有各种仪表,向司机反映提升机的运行情况和设备的各种状况。保护系统主要包括测速发电机装置、光电编码器、护板、护栏、护罩等,测速发电机和光电编码器的主要作用:通过设在操纵台上的仪表向司机指示提升机的实际运行速度;参与等速运行和减速运行阶段的超速保护等。

这种永磁同步减速电动机驱动矿井提升机的工作过程为:永磁同步减速电动机是将永磁同步电机与行星减速器配置成一体,永磁同步电机的转子位于定子内的部位设置有永磁体,定子上分布有三相绕组,通入三相交流电后就会形成旋转磁场,和转子上固定磁极的永磁体互相作用产生磁力转矩,从而带动转子进行旋转,转子的旋转速度最终与定子中产生的旋转磁场的转速相等,通过变频器控制系统改变定子频率的方法从而改变电机同步转速的方法实现调速。永磁同步电机经一级行星减速后通过齿轮联轴器与提升机主轴装置连接,将动力传给缠绕钢丝绳的卷筒上,实现提升机容器在井筒中升降的目的。

4 永磁同步减速电机的优点

4.1 高效节能

永磁同步减速电机与低速永磁同步电机一样具有较高效率、较高的功率因数;永磁同步减速电机一般比低速永磁同步电机的定子极数少,定子铜损更低,相对更节能。

4.2 起动转矩大,过载能力强

传统驱动系统使用的异步电动机起动转矩通常是额定转矩的 120%~150%,而永磁同步减速电机与低速永磁同步电机相似,其起动转矩同样是额定转矩的 150%~200%,亦可有效避免因堵转、过载而造成的电机损坏。

4.3 避免电网及机械冲击

系统运用编码器闭环矢量控制技术(VC)变频起动,能实现系统传动的缓慢匀速起动,起动转矩大,动态响应快,过载能力强避免了电动机起动的瞬间大电流给电网带

来的冲击,以及转矩波动给传动系统带来的机械冲击,由此降低了系统的电网故障和机械故障。

4.4 调速范围宽、调速精度高

永磁同步减速电机的额定频率一般在 40~60Hz 之间,而低速永磁同步电机的额定频率一般不超过 20Hz,所以永磁同步减速电机与低速永磁同步电机相比额定频率高、有更宽的调速范围和更大的调速精度,变频器更容易调速控制。

4.5 体积小、温升范围小、比功率大

永磁同步减速电机具有体积小、温升范围小、比功率大大的优势,在驱动低转速大扭矩负载时该优点更为明显:①永磁同步减速电机比低速永磁同步电机极数少,电机体积更小;②永磁同步减速电机电机的铜损更小,电机温升范围更小;③高性能永磁材料的应用,电机的比功率大,与同容量低速永磁同步电机相比,永磁同步减速电机体积更小。

4.6 系统维护简单

由于永磁同步减速电机采用一级行星减速器,且一级行星减速器输入转速低、速比小、传动效率高,多采用甘油润滑,几乎没有维修量,节约了使用成本,减低了维护工作量。

4.7 占地面积小、投资费用少

永磁同步减速电机的占地面积一般小于低速永磁同步电机的 1/2,可大大节约基础土建的成本;且永磁同步减速电机的成本一般只有相同功率低速永磁同步电机的 1/3。

5 与其他几种结构矿井提升机配置、运行性能和综合成本对比

以 JKZ-3.2*2.6 矿井提升机为例,假设所涉及矿井提升机均为竖井提升,最大提升重量均为 200kN(含钢丝绳、提升容器和载重等),所选钢丝绳的直径均为 42mm,额定最大提升速度均为 5.96 米/秒,所选电动机均为 6KV 高压电动机,调速变频器均为同一厂家同一系列四象限高压变频器。下面列举了现有六种提升机结构的配置和运行情况。

从表 1 数据可以看出,永磁同步减速电动机直驱主轴装置+四象限变频驱动的模式下的系统综合传动效率最高,最节能。该模式提升机的驱动电机采用额定电压 6KV、额定功率 1250kW、额定转速 200 转每分钟、额定频率 50Hz 的永磁同步电机和速比 5.62 的一级行星减速器组成,一级行星减速器传动效率较高,可达 98%左右,与其他模式下的驱动结构相比,在设备重量、效率、维护量、成本以及节能等方面都有比较明显的优势,综合节能效果与相同功率异步电机配套减速器的变频器驱动结构相比高了 10%~15%。该提升机的驱动永磁减速电机转速是直驱电机的 5.62 倍,相同传动扭矩下电机转子自身输出的转矩较直驱电机可降低到了 1/5.62,电机本体成本更是低至同功率低速直联永磁同步电动机的约 1/5.62 左右。

表 1 现有六种提升机结构的配置和运行情况

内 容	永磁减速电动机直驱矿井提升机 JKZ-3.2×2.6P	低速永磁电机驱动矿井提升机 JKZ-3.2×2.6P	永磁电机内装式提升机 JKZN-3.2×2.6P	高速永磁+减速器+主轴装置 JKZ-3.2×2.6P	异步电机+减速器+主轴装置 JKZ-3.2×2.6P
钢丝绳	Φ=42mm	Φ=42mm	Φ=42mm	Φ=42mm	Φ=42mm
提升速度	5.96 米/秒	5.96 米/秒	5.96 米/秒	5.96 米/秒	5.96 米/秒
综合最大提升力	200kN	200kN	200kN	200kN	200kN
电机额定转速	200 转/分钟	35.59 转/分钟	35.59 转/分钟	750 转/分钟	743 转/分钟
减速器及速比	YN1000-1250-5.62	/	/	XL-1120/21.07	XL-1120/20.88
电机额定频率	50Hz	17.8Hz	17.8Hz	50Hz	50Hz
计算电机功率	1217kW	1192kW	1192kW	1296kW	1340kW
所选电机功率	1250kW	1250kW	1250kW	1400kW	1400kW
功率下降	10.7%	10.7%	10.7%	/	/
电机额定效率	97%	93%	92%	97%	90%
75%负载电机效率	96.5%	92%	91.5%	96.5%	82%
50%负载电机效率	96%	91%	90.5%	96%	70%
25%负载电机效率	90%	85%	84.5%	90%	39%
空载电机效率	85%	80%	79%	85%	0%
电机的功率因数	96%	95%	95%	96%	87%
减速器的传动效率	98%	100%	100%	92%	92%
变频器的效率	97%	97%	97%	97%	97%
整机效率	92.2%	90.2%	89.2%	86.6%	80.3%
满载电流	129.2A	136.2A	137.7A	144.7A	172A
空载电流	2.5A	4.9A	5A	3.5A	56.5A
25%负载电流	32.4A	35.5A	35.9A	36.3A	68.8A
50%负载电流	64.7A	70.5A	71.2A	72.4A	96.6A
75%负载电流	96.9A	105.5A	106.8A	108.6A	130.4A
维护	量非常小、简单、方便	量最小，维护不方便	量小，极不方便	量大、相对简便	量大，简单、方便
安全性	停车时可先零速悬停，再抱闸；有效防止失速飞车和机械振动	停车时可先零速悬停，再抱闸；有效防止失速飞车和机械振动	停车时可先零速悬停，再抱闸；有效防止失速飞车和机械振动	停车时可先零速悬停，再抱闸；有效防止失速飞车和机械振动	采用电机制动器防止失速飞车和机械振动
调速精度	高于 1:500	1:200	1:200	高于 1:500	1:100
满载运行年耗电量	3768000KWH	3846000KWH	3888000KWH	4014000KWH	4321400KWH
满载运行年耗电费	301.44 万元	307.68 万元	311.04 万元	321.12 万元	345.712 万元
节能效果 0.8 元/度	节约 44.272 万元	节约 38.032 万元	节约 34.672 万元	节约 24.592 万元	/
设备重量不含天轮和电控	约 73 吨	约 120 吨	约 112 吨	约 82 吨	约 81 吨
设备造价 不含天轮和电控	约 235 万元	约 445 万元	约 410 万元	约 215 万元	约 210 万元
性价比	高	最低	低	高	高
占地面积	小，约 65 平米	小，约 75 平米	最小，约 60 平	大，约 85 平米	大，约 85 平米

(注：上表计算年耗电量采用每年 300 天、每天 20 小时、每 KWH 电费按 0.8 元；年耗电量计算采用不同负载率工况的积分加权法。)

6 现场使用情况

新郑煤电赵家寨煤矿西风井建井项目中采用 2JKZ-4×2.1PY 系列永磁同步减速电机直驱型提升机，如图 5 所

示，该提升机于 2021 年底安装调试后已投入运行。

中煤五公司三处在山西华阳集团新能股份有限公司一矿阎家庄风井广场项目回风建井项目中 JKZ-3.6×3PY

系列永磁同步减速电机直驱型提升机,如图6所示,该提升机于2023年3月安装调试后已投入运行。

两个项目中所用永磁同步减速电机直驱方式与异步电机高压变频方式相比,平均节能均高于10%。

两个项目的永磁同步减速电机参数均为:

电机本体型号:TBVF-1250-200YC(6000),额定电压6000KV,额定功率1250kW,额定电流130A,额定频率50Hz,额定转速200转每分钟,功率因数 $\geq 95\%$,效率 $\geq 97\%$ 。内置一级行星减速器:YX-1400,速比5.6,输出扭矩400KNm。



图5 新郑煤电赵家寨煤矿西风井建井2JKZ-4 $\times$ 2.1PY永磁同步减速电机直驱提升机



图6 阎家庄风井广场项目回风建井项目JKZ-3.6 $\times$ 3PY永磁同步减速电机直驱提升机

7 结束语

此种永磁同步减速电机直驱矿井提升机的体积小,功率密度大且结构紧凑,安装更便利,永磁同步减速电动机为一体化设计,直接与矿井提升机主轴装置连接,保留了直驱电机的连接方便和输出转矩大的优势,使提升机的维护更简单,同时也降低了提升机安装时基础土建的成本;该永磁同步减速电机传动润滑系统,省去了电机散热风机和减速器润滑站,运行噪音较小,更加环保。

[参考文献]

- [1]李超颖,杨安,王斌.永磁同步电动机在竖井提升机上的应用[J].有色金属设计,2021,6(48):2.
 - [2]唐国祥.矿井提升机故障处理和技术改造[M].北京:北京机械工业出版社,2005.
 - [3]史光辉,刘涛涛,张念钰.大功率永磁变频技术在矿井提升机上的应用研究[J].矿山机械,2020(4):1.
 - [4]卢宝全.内装式矿井提升机特殊结构及矢量控制在其中的应用[C].中国:全国矿山建设学术会议论文选集(下册),2003.
 - [5]刘文利,杜庆楠.大型低速同步电动机高压变频器在矿井提升机上的应用[J].矿山机械,2011,39(7):4.
 - [6]卢宝全.内装式矿井提升机特殊结构及矢量控制在其中的应用[C].中国:全国矿山建设学术会议论文选集(下册),2003.
 - [7]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.
- 作者简介:邱战峰(1982.4—),毕业院校:河南科技大学,所学专业:自动化,当前就职单位:洛阳九亿重工集团有限公司,职务:技术副总,职称级别:工程师。