

# 起重机电机系统裕量评价指标研究及测试

贡 力

太原重工技术中心 太原 030024

**摘 要:** 提出了电机系统裕量评价指标, 采集了首钢京唐 480 t 铸造起重机大车运行机构电机电流转矩等数据, 计算了裕量评价指标, 验证了该系统电机容量选型偏大。

**关键词:** 铸造起重机; 裕量评价; 容量校验; 发热校验; 过载校验

**中图分类号:** TM306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0785 (2015) 04-0099-04

**Abstract:** The paper puts forward the margin evaluation index for the motor system. The data such as motor current and torque are collected for the travelling mechanism of 480 t ladle crane, and the margin evaluation index is calculated. It's shown that the selected motor of the system has relatively large capacity.

**Keywords:** ladle crane; margin evaluation; capacity verification; heating verification; overload verification

## 0 引言

起重机电机系统主要指各机构电机及其控制器, 如变频器、调压调速装置等。通常明确了额定载荷、起重机自重、起升或运行速度、加速时间、车轮直径等条件, 即可确定所需电机容量, 适当放大即可确定控制器容量。GB/T 3811—2008《起重机设计规范》中详细给出了一般的电机选型公式及校验公式, 许多专业起重机设计单位根据多年的设计经验, 也各自形成了独特成熟的电机系统选型方法。但是, 不同的选型方法可能会得到不同的选择结果。对于吨位相同、结构类似的铸造起重机运行机构, 国外起重机所选电机容量就小于国内。在设计起重机时, 追求过高可靠性, 选过大容量电机, 会造成成本增加, 电机工作时裕量过高、效率较低等弊端。

目前, 企业纷纷走上精细化设计的道路, 从设计源头上降低成本, 提高效益。太重技术中心把降低电机容量作为降本增效的目标之一, 故对各类起重机的电机系统运行参数进行实测, 并将测试结果与系统额定值作比较, 得到目前电机系统的裕量, 根据裕量大小确定是否降低电机容量以及降低几个等级。

## 1 电机系统裕量评价指标

电机系统裕量, 可以通过计算电流、转矩等

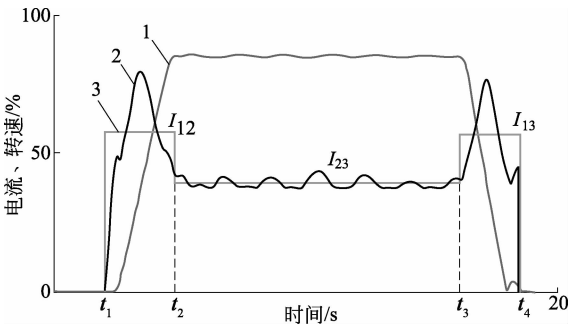
参数实际运行值占额定值或最大值的百分比来评估, 下面分电机裕量与变频器裕量 2 部分讨论。

### 1.1 电机裕量校验

#### 1) 额定电流校验

额定校验方法仿照 GB/T 3811—2008《起重机设计规范》中的等效平均功率法。

图 1 中曲线 2 为起重机工作在额定载荷下, 且从静止直接加速到 4 挡的最短时间来启动时, 电机一个启停周期的电流曲线, 曲线 1 为该周期的转速变化曲线。根据转速信息可以清楚地将该过程分为 3 个阶段,  $t_1 \sim t_2$  区间为启动阶段, 转速上升, 电流呈现峰值;  $t_2 \sim t_3$  区间为平稳运行阶段, 转速不变, 电流总体平稳, 有小波动;  $t_3 \sim t_4$  区间为制动阶段, 转速下降, 电流再次呈现峰值。



1. 转速曲线 2. 电流实际工作曲线  
3. 电流等效工作曲线

图 1 电流转速工作曲线

根据发热等效原则，一段电流变化曲线能以有效值代替，计算见式（1）。

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n i_k^2}{n}} \quad (1)$$

$t_1 \sim t_4$  区间为一个完整启停周期，期间电流总有效值记为  $I_{14}$ ，为求整洁未在图上标明。同理将启动、平稳运行、制动 3 个阶段有效值分别记为  $I_{12}$ 、 $I_{23}$ 、 $I_{34}$ ，以阶梯曲线 3 表示。

其中  $k$  表示曲线的样点序号， $i_k$  表示第  $k$  个样点的电流值， $n$  表示曲线包含的样点总数。

电机的额定电流是指保证温升不超允许值最大长期运行电流<sup>[2]</sup>。故额定电流校验应该计算长时间工作时电流的总有效值，而不只是某个启停周期的有效值。这里采集正常工作时 3 h 的电机工作曲线，内部包含多个类似图 1 所示含一个启停过程的工作片段，各片段中间也间隔有电流值为 0 的暂停片段。计算 3 h 时长曲线上所有工作片段的总有效值，记为  $I_{3\text{hour}}$ 。

记电机的额定电流为  $I_N$ ，则总有效电流占电机额定电流的比例为  $I_{3\text{hour}}/I_N$ 。该值越大，裕量越小。

### 2) 电流过载校验

电机只要进行额定电流校验，即等效发热校验即可。事实上，电机即使是不接任何控制设备直接启动一次，自身也不会被烧毁，只是工厂供电对冲击有严格要求，不允许这样。变频器抗过载能力远远逊色于电机，故仅对变频器做过载校验，而不对电机做过载校验。

### 3) 额定转矩校验

电机的额定转矩和额定电流值一样，都是在电机长期工作时，发热达到最高允许温升的平衡状态下确定的，校验其中之一即可，这里选择校验电流。

### 4) 转矩过载校验

过载转矩的校验也是非常重要的，会出现额定电流或额定转矩校验通过，但启动或过载校验通不过的情况。图 1 的曲线 2 也可视为转矩曲线，同样根据转速将其分为启动、平稳、制动 3 个阶段，分别求出每个阶段转矩的有效值，记为  $T_{12}$ 、 $T_{23}$ 、 $T_{34}$ 。

3 h 转矩曲线中包含多个图 1 所示工作片段，

有些处于额定载荷状态下，另一些处于空载状态下；有些是从静止直接到 4 挡，加速时间短，另一些是从静止到 3 挡或逐挡加速，加速时间较长。可以从多个额定载荷下，且最快启动的工作片段中选出最大的  $T_{12}$  值。

记电机的额定转矩为  $T_N$ ，最大转矩为  $T_m$ ，其中  $T_m = 2.8T_N$ 。启动阶段转矩有效值占最大转矩的比例为  $T_{12}/T_m$ ，反映出电机加速启动时的转矩裕量。

## 1.2 变频器裕量校验

以下所涉及的变频器电流均指输出电流，等于电机总输入电流。所谓总输入电流是考虑 1 台变频器驱动多台电机的情况。

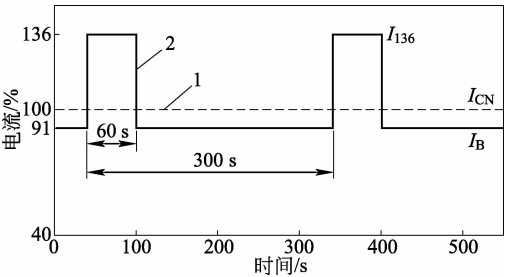
### 1) 额定电流校验

变频器选型在电机选型确定之后进行，其容量由电机容量适当放大得到，故变频器额定电流必然大于电机额定电流（若一台变频器驱动  $n$  台电机，则其额定电流大于  $n$  倍电机额定电流）。所以变频器裕量更大，无需校验。

### 2) 过载校验

过载校验方法依据《西门子变频器选型手册》设计指南部分。

图 2 中，曲线 1 表示变频器额定电流，即 100% 电流，记为  $I_{\text{CN}}$ 。曲线 2 中较高部分为最大允许电流，为额定电流的 136%，记为  $I_{136}$ ，最长不超过 60 s，否则装置达到最大允许温度，该值就是启动电流的最大允许值。较低部分为基本负载电流，记为  $I_B$ ，在最大超载工作时允许达到额定电流的 91%。可以验证额定电流  $I_{\text{CN}}$  由一个周期 300 s 上的红色实线求平均值得到。



1. 变频器额定电流线 2. 变频器最大超载电流曲线

图 2 变频器最大超载电流图

图 1 中曲线 2 表示电机总输入电流曲线，也就

是变频器输出电流曲线，其启动、平稳运行、制动 3 阶段有效值为  $I_{12}$ 、 $I_{23}$ 、 $I_{34}$ 。

3 h 电流曲线中包含多个图 1 所示工作片段，有些处于额定载荷状态下，另一些处于空载状态下；有些是从静止直接到 4 挡，加速时间短，另一些是从静止到 3 挡或逐挡加速，加速时间较长。可以从多个额定载荷下，且最快启动的工作片段中选出最大的  $I_{12}$  值。

对变频器进行过载校验，计算图 1 中电流工作曲线启动阶段等效值与变频器最大允许超载电流值比例即可，即  $I_{12}/I_{136}$ ，反映出启动电流过载裕量。

需要说明的是，由于变频器对于最大超载电流及超载时间的规定也是基于装置最大温升，所以，这里选用了启动阶段发热等效电流即有效值，而不是最大值来进行变频器过载校验。另外，变频器可以设置最大电流幅值  $I_{\max}$ ，在启动过程中，若启动电流达到最大值时将不能继续上升，而是根据转速上升情况决定是保持该值运行还是直接下降。若选用最大值来校验，则只要启动电流达到  $I_{\max}$ ，算出的比例值都是  $I_{\max}/I_{136}$ ，而与保持  $I_{\max}$  运行时长无关，这与事实不符。若选用启动阶段有效值则可反映出这种差异。

## 2 测试对象

测试对象为太重生产的 480 t 铸造起重机大车运行机构，测试地点为首钢京唐。大车运行机构电机系统主要参数为

- 型号：SIM - 1LG6
- 功率：132 kW
- 电流：138 A
- 转速：740 r/min
- 转矩：1 704 N·m

- 大车逆变器参数为
- 型号：6SE70
- 额定电流：354 A
- 超载 1.36 倍电流：481 A

## 3 测试方法

将 PC 通过串口线分别接入大车逆变器，利用西门子的 Drivemonitor 软件，采集包括电流  $I$ 、转速  $V$ 、转矩  $T$ 、功率  $P$  等参数，采样频率设置为 45 ms，采样总时长 3 h，同时人在司机室记录起重机运行工况，如图 3 所示。

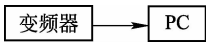


图 3 变频器采样系统图

## 4 测试数据

试验时首钢 480 t 铸造起重机满载为 420 t 标准载荷（钢包与满包钢水总质量），0 挡直接加速至 4 挡启动时间约为 3 s。大车运行机构为矢量闭环控制，故为保持大车速度恒定运行，系统转矩一直处于波动变化中，以实时平衡轨道平直度以及粗糙度引起的阻力变化以及自身传动链的动载荷变化。转矩的波动必然引起定子电流的波动，不过比较微小，如图 1 曲线 2 平稳运行阶段所示。

如前所述，在进行电机额定电流校验时，计算 3 h 时长曲线上所有工作片段的总有效值  $I_{3\text{hour}} = 120\text{ A}$ 。

在进行电机转矩过载与变频器过载校验时，需从 3 h 历程的所有工作片段中，选出多组满足 420 t 满载载荷、约 3 s 最快加速时间条件的片段，这里选出 10 组，分别求出各自的  $T_{12}$ 、 $I_{12}$  值，见表 1。

表 1 10 个启停周期  $T_{12}$ 、 $I_{12}$

组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{12}/(\text{N} \cdot \text{m})$	1 653	1 667	1 740	1 655	1 640	1 743	1 666	1 650	1 650	1 672
$I_{12}/\text{A}$	161	162	165	161	160	165	162	161	161	162

然后从 10 组中选出最大值，在第 6 组中，分别为  $T_{12} = 1\,743\text{ N} \cdot \text{m}$ ， $I_{12} = 165\text{ A}$ 。

该系统 1 台变频器驱动 2 台电机，故以上实测数据均为 2 台电机的合电流或合力矩。进行电机《起重运输机械》2015 (4)

校核时，应使用 2 倍额定值。查表 1 电机额定电流  $I_N = 2 \times 138 = 276\text{ A}$ ，电机额定转矩  $T_N = 2 \times 1\,704 = 3\,408\text{ N} \cdot \text{m}$ ，电机最大转矩  $T_m = 2.8T_N = 9\,542\text{ N} \cdot \text{m}$ 。变频器校核时，使用额定值即可，查表 2

得  $I_{136} = 481\text{ A}$ 。

最后按照 1 中的评价方法得到各裕量评价指标比例值, 结果见表 2。

表 2 裕量指标比例值 %

$I_{3\text{ hour}}/I_N$	$T_{12}/T_m$	$I_{12}/I_{136}$
43.5	18.3	34.3

5 测试结果分析

1) 表 4 中的 3 个指标均没有超过 50%, 说明正在使用中的电机较大裕量, 可以选用比目前低 1~2 个级别容量的电机替代。目前没有相关标准规定实测值占额定值的比例应该达到多少就是适中, 但认为至少也应有指标超过 60%, 否则电机容量选型过于保守, 造成浪费。

2) 表 4 中的 3 个指标中最大的是总有效电流占电机额定电流的比例  $I_{3\text{ hour}}/I_N$ , 达到 43.5%, 其裕量相对较小, 其他都不超过 40%, 裕量更大。故在以后的验证中应对  $I_{3\text{ hour}}/I_N$  给予更大的关注。

3) GB/T 3811—2008《起重机设计规范》中要求, 铸造起重机各机构应该具备双组电机驱动, 并在突发仅剩单组电机工作的意外情况下, 继续完成一个工作循环。大车运行机构电机选型偏大的一个重要原因是考虑单组运行的极限情况, 应该再测试一下单组运行下大车机构电机是否仍具有裕量, 有多少。因条件不具备, 未能进行此项试验。但可以做简单估算, 单组运行电机输出的机械功率变为原来的 2 倍, 但此时工作点接近额

定功率, 电机效率也大大提高<sup>[3]</sup>, 故输入电流应该小于原来的 2 倍, 即单组运行下  $I_{3\text{ hour}}/I_N < 87\%$ , 仍旧满足要求。单组运行可以缓慢启动, 从静止加速到 2 挡, 在 2 挡下完成最后一个循环, 这样, 可以大幅降低启动电流、启动转矩, 满足电机最大转矩及变频器最大电流的要求。

4) 该 480 t 铸造起重机为 S3 下 JC%40 工作制, 该系统选用的是西门子电机, 其铭牌标识为 S1 工作制的参数。若折算为 S3 下 JC40% 工作制, 额定功率、额定电流还将进一步放大, 百分比还将变小, 裕量加大。

5) 该系统大车运行机构为闭环控制, 响应较快, 加速时间设置为 3 s, 还可将其设为开环控制, 加速时间为 7~8 s, 后者启动电流、启动转矩都要小于前者,  $T_{12}/T_m$ 、 $I_{12}/I_{136}$  比值更小, 即裕量更大。事实上铸造起重机多数大车运行机构都是按照后者来设置。

参考文献

[1] GB/T 3811—2008 起重机设计规范[S].

[2] 李发海, 王岩. 电机与拖动基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[3] 贡力, 张皓琨, 闫锦锋, 等. 铸造起重机起升机构效率的计算与实测[J]. 起重运输机械, 2014 (11).

作者地址: 太原万柏林区玉河街 53 号太原重工股份有限公司技术中心测控室

邮 编: 030024

收稿日期: 2014-09-02

中海工业 2 台 900 t 门式起重机联吊作业试验成功

2015 年 3 月, 中海工业(江苏)有限公司对 3 号船坞 2 台 900 t 门式起重机进行了联吊作业试验工作, 此次联吊试验取得圆满成功。

上午 9 时, 一切准备工作就绪, 随着总指挥一声令下, 长度 68.88 m, 宽度 18.17 m, 高 5.614 m, 质量 846.5 t 的分段被缓缓吊起, 至此标志着 900 t 造船门式起重机联合作业试验开始。经过近 6 个小时的各项工况的操作, 分段平稳运至预定位置, 所有测试数据均符合设计要求。

本次联吊试验经过周密策划、方案评审和现场施吊已达到了预期效果, 成功检验了 3 号船坞 2 台 900 t 门式起重机在允许范围内联合作业时的同步性、可靠性和安全性, 在大型设备运行和大型分段总组方面积累了经验, 将为江苏公司进行 20.8 万 t 散货船、9 400 TEU 集装箱船等“大、高、新”船舶建造和进一步提升造船生产效率、扩大造船产能奠定坚实的基础。