

文章编号:1000-582X(2003)10-0076-05

QBT80/45 起重布料两用塔机电气控制系统的可靠性

姚加飞, 王晓静, 童明傲, 薛大金

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400045)

摘要:通过对 QBT80/45 起重布料两用塔机电气控制系统分析,建立了 QBT80/45 起重布料两用塔机电气控制系统的可靠性数学模型;分别在电气控制系统设计的初期和后期采用元器件计数法和元器件应力分析法对 QBT80/45 塔机电气控制系统进行了可靠性预计,后期的可靠性计算,较全面地考虑了电、热和机械环境应力等因素对元器件效率的影响,其结果表明两用塔机电气控制系统具有较高的可靠性。

关键词:两用塔机;电气控制系统;可靠性预计;元器件计数;元器件应力分析

中图分类号:TM762

文献标识码:A

QBT80/45 起重布料两用塔机不仅克服了以往国内外同类产品布料幅度上的不足,而且具有以下特点:实现了大幅度布料且不影响塔机性能,使布料半径达到 45 m 以上;布料系统的载荷与起重特性相协调一致,不为其中任何一种工况加大结构,避免了整机成本提高;实现了布料、起重 2 种工况快速转换,2 套系统,既独立又互相联系,靠转换开关实现工况转换,提高了塔机的利用率等,在国内同类产品中处于领先地位。

QBT80/45 两用塔机有起升、变幅、布料、回转和顶升 5 个机构,有起重、布料、顶升和遥控 4 种工况。

根据塔机的运行特性和中国建筑研究院廊坊机械化研究分院提出的要求,QBT80/45 塔机对电气控制系统有如下的要求:1)起升机构的转速分 5 档,其中 1、2 档为就位档,3、4、5 档为运行档,要求在起动及变速过程中,转速平稳过渡。起升机构速度调节由变频器完成。2)变幅电机和回转电机均是鼠笼式三相异步电动机,它们的四档和三档速度调节由变频器完成。3)回转机构由 2 台电机来拖动。另外,QBT80/45 塔机对起升、变幅和回转机构的电控系统还有一些特殊要求。4)在布料工况下,布料卷扬机与布料摆动臂无需调速。5)工况转换条件:当空钩上升到上升停车位,且变幅小车外行至外行减速位时,才允许由起重工况转换到布料工况。当布料臂完全收臂到位(X_1 与

X_4 同时动作),才允许由布料工况转换到起重工况[应在 X_3 未动作的条件下先将摆动臂内旋至极限位(X_4 动作),再将 I 节臂收臂到收臂限位(X_1 动作)]。

注: X_1 ——布料系统 I 节臂收臂限位; X_2 ——布料系统 I 节臂放臂限位;

X_3 ——布料系统 I、II 节臂夹角限位; X_4 ——布料系统 II、III 节臂靠拢限位;

X_5 ——布料系统 II、III 节臂夹角限位; X_6 ——布料系统 I、III 节臂碰接限位。

1 电气控制系统方案选择

QBT80/45 两用塔机的电气控制系统分为主回路和控制回路。其中,起升电机、变幅电机、回转电机、布料卷扬机、布料油泵电机、顶升油泵电机以及起升、变幅、回转电机的制动器、调速装置均由中国建筑研究院廊坊机械化研究分院提供。

电气控制系统在主电路最前端设置空气开关和熔断器,作为短路及过流保护;其后设置接触器主触点作为主回路电源开关。

控制回路采用 PLC 控制系统,根据用户对 QBT80/45 塔机电气控制系统的要求,确定了 PLC 的输入和输出点数,选用美国通用电气公司 GE90-30 型组装式 80 点 PLC,其控制系统框图如图 1 所示:

• 收稿日期:2003-07-10

基金项目:国家“95”攻关项目(96-730-04-02)

作者简介:姚加飞(1956-),男,四川武胜人,重庆大学副教授,主要从事智能控制与可靠性研究。

其中:中间单元为中间继电器环节;执行单元为接触器环节。

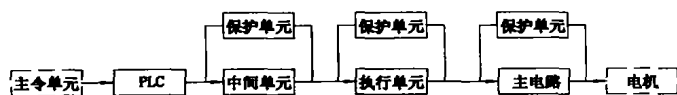


图 1 电气控制系统结构框图

注:虚线框内的部分由中国建筑研究院廊坊机械化研究分院提供。

2 QBT80/45 塔机电气控制系统的可靠性数学模型

从系统结构框图中,可以看出,除保护单元外,在组成单元的所有单元中,任何一个单元发生故障,都将导致整个系统发生故障;只有每个单元都不失效,系统才不失效,它们是完成系统功能必不可少的单元,因此该电气控制系统为独立串联系统^[1-2],其数学模型如下:

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t)R_3(t)R_4(t) = \prod_{i=1}^4 R_i(t) \quad (1)$$

其中: $R_s(t)$ ——系统的可靠度; $R_1(t)$ ——PLC 的可靠度(软件和硬件一起考虑); $R_2(t)$ ——中间单元的可靠度; $R_3(t)$ ——接触器环节的可靠度; $R_4(t)$ ——主电路的可靠度。

设 $\lambda_1(t)$ 、 $\lambda_2(t)$ 、 $\lambda_3(t)$ 和 $\lambda_4(t)$ 分别是 PLC、中间单元、接触器环节和主电路的失效率,则系统的可靠度

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s(t)} = e^{-\sum_{i=1}^4 \lambda_i(t)} \quad (2)$$

系统的失效率

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i(t)$$

系统的平均故障间隔时间

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda_s}$$

由式(2)可知,单元数目 n 、失效率 λ 及工作时间 t 3 个因素对串联系统可靠度的影响都是等效的。为了提高串联系统的可靠度,可采取减少单元数、降低单元失效率(使用高可靠性、低失效率的单元)或缩短工作时间等措施^[3]。在研制 QBT80/45 塔机电气控制系统的过程中,主要考虑第二种措施即降低单元的失效率。为此,分别在电气控制系统设计的初期和后期采用元器件计数法和元器件应力分析法对 QBT80/45 塔机电气控制系统进行了可靠性预计。

3 可靠性预计

3.1 元器件计数可靠性预计法

元器件计数可靠性预计法是根据设备中各种元器件的数量及该种元器件的通用失效率、元器件质量等级及设备的应用环境类别来估算产品可靠性的一种方法。其计算设备失效率 λ_{AP} 的数学表达式为

$$\lambda_{AP} = \sum_{i=1}^n N_i(\lambda_{Gi}\pi_{Qi}) \quad (3)$$

式中, λ_{AP} ——设备总失效率; λ_{Gi} ——第 i 种元器件的通用失效率; π_{Qi} ——第 i 种元器件的通用质量系数; N_i ——第 i 种元器件的数量; n ——设备所用元器件的种类数目。

表 1 为元器件计数法计算表和各元器件对系统可靠性的影响程度分析表。

表 1 元器件计数可靠性预计法计算表

元器件种类	数量 N	π_o	$\lambda_c/(10^6/h)$	$\lambda_c\pi_o/(10^6/h)$	$N(\lambda_c\pi_o)/(10^6/h)$	对系统失效率的影响程度/%	
PLC	1	1.2	3.330 00	3.996 00	3.996 0	3.96	
中间继电器	42	1.0	0.300 00	0.300 00	12.600 0	12.48	
热继电器	1	1.0	5.700 00	5.700 00	5.700 0	5.64	
过流继电器	2	1.0	1.100 00	1.100 00	2.200 0	2.18	
相序继电器	1	1.0	1.100 00	1.100 00	1.100 0	1.09	
接触器	33	1.0	1.100 00	1.100 00	36.300 0	35.95	
整流桥	8	3.0	0.120 00	0.360 00	2.880 0	2.85	
线绕电阻器	10	1.5	0.413 00	0.619 50	6.195 0	6.13	
固定电阻器	3	1.5	0.035 00	0.052 50	0.157 5	3.42	
线绕电位器	1	1.5	2.300 00	3.450 00	3.450 0	0.16	
变压器	4	3.0	0.021 00	0.063 00	0.252 0	0.25	
接线	压接	780	1.0	0.007 30	0.007 30	5.694 0	5.64
	焊接		1.0	0.000 44	0.000 44	0.286 0	0.28
连接器	2	3.0	1.400 00	4.200 00	4.200 0	4.16	
熔断器	1	3.0	1.140 00	3.420 00	3.420 0	3.39	
断路器	1	3.0	3.200 00	9.600 00	9.600 0	9.51	
调速装置	3	5.0	0.190 00	0.950 00	2.850 0	2.82	
元器件总数:958			$\Sigma N(\lambda_c\pi_o) = 100.981$		MTBF _s = 9 902 h		

注:元器件的应用环境不同,其失效率也不同,环境越恶劣其失效率越高。因此在确定通用失效率时,应先确定其环境类别。该电控系统安装在塔机上,它的工作环境属 GF 类(即不受热的建筑物内或通风较好的机架上,受振动、冲击影响),它的通风工作环境温度 42℃。

由表 1 可以看出,对电气控制系统可靠性影响最大的元器件是接触器和继电器,因此,在研制电气控制系统的过程中着重提高这两种元器件的质量等级并对其进行降额设计等措施来降低它们的失效率,从而提高系统的可靠性。

3.2 元器件应力分析可靠性预计法

在设计定型(样机研制)阶段,由于已经知道了产品的每个组成部分的详细电路图、元器件清单及每个元器件所承受的应力和工作环境,可采用元器件应力分析预计法对产品进行详细地预计,确定可靠性的薄弱环节,并采取相应措施改进设计,以实现产品的可靠性目标值^[4]。

元器件应力分析可靠性预计法是通过分析元器件所承受的应力,较全面地考虑了电、热和其它气候、机械环境应力等因素对元器件失效率的影响,计算元器件在该应力条件下的工作失效率来预计设备或系统可靠性。

3.2.1 元器件应力分析预计法计算步骤

按设备或系统的功能原理绘制其可靠性结构框图,确定各单元间的串、并联关系,并建立其数学模型;分析各元器件的应用公式、工作环境温度及其环境应力,以及负载电应力比等工作应力数据;汇编设备或系统的元器件清单,包括元器件名称、型号规格、数量、产品标准或技术文件、性能额定值,及有关的设计、工艺、结构参数和工作应力数据等;按各类元器件工作失效率模型,计算每个预计单元内各元器件的工作失效率;将上述步骤所得到的数据填入失效率预计表内;将预计单元内元器件的工作失效率相加,得单元的失效率;按设备或系统的可靠性结构框图及其数学模型,计算设备的可靠度与平均故障间隔时间等可靠性指标。

元器件应力分析预计法的基础是元器件失效率的计算。元器件失效率模型是元器件失效率与影响失效率因素之间的关系模型。大多数种类的元器件有基本失效率模型与工作失效率模型。基本失效率模型一般仅计温度和电应力对元器件失效率的影响;而工作失效率模型,则除反应热、电等基本因素外,还包含其它多种的失效率影响因素^[5]。

工作失效率(除集成电路外)一般表示为:

$$\lambda_p = \lambda_b \prod_{i=1}^n \pi_i$$

其中, λ_p ——元器件的工作失效率; λ_b ——元器件的基本失效率; π_i 的含义见后面的具体计算中。

3.2.2 元器件各单元的工作失效率^[6]

由于各元器件的应用方式、工作环境温度及其它环境应力,以及负载比等工作应力数据都不相同,且它

们对元器件的失效率的影响也不同,下面分别来讨论各单元的工作失效率。

1) PLC。由于“手册”上没有 PLC 的有关数据,只能根据厂家提供的数据来进行计算。GE90-30 组装配式 PLC 硬件的平均无故障时间($MTBF_p$) 是 30 万 h。而它的软件,只要在设计调试阶段,充分考虑用户要求,认真谨慎,是能够保证它在硬件的平均无故障时间内是不失效的。因此,在计算 PLC 的失效率时,将软、硬件当作一个整体考虑:

$$\lambda'_p = \frac{1}{MTBF_p} = 3.3 \quad (4)$$

考虑到环境因素的影响,取一修正系数 $\alpha = 0.2$, 则 PLC 的失效率为:

$$\lambda_p = (1 + \alpha)\lambda'_p = 3.96 \quad (5)$$

2) 中间单元。它的各元器件应力分析表如表 2 所示。

表 2 中间单元各元器件应力分析表

元器件	中间继电器		整流桥	变压器	接线 (压接)
	双刀双掷	三刀双掷			
π_E	2.00	2.0	3.0	2.0	
π_C	1.75	3.0			
π_F	3.00	3.0	1.0	4.0	
π_{CYC}	2.00	2.0			
π_Q			0.5		
π_T			1.5		
数量 N	21.0	21.0	2	2	339
电流应力比	0.5	0.5			
λ_b	0.031 005	0.031 005	0.002 100	0.000 139	
λ_p	0.651 105	1.116 180	0.004 700	0.001 113	0.007 300
$N\lambda_p$	13.673 200	23.439 800	0.009 400	0.002 226	1.154 700
元器件总数:383				$\Sigma \lambda = 38.279 326$	

各元器件失效率模式:

中间继电器:

$$\lambda_p = \lambda_b \prod \pi_i = \lambda_b (\pi_E \pi_C \pi_{CYC} \pi_F) \text{ 失效数 } / 10^6 \text{ h} \quad (6)$$

变压器:

$$\lambda_p = \lambda_b \prod \pi_i = \lambda_b (\pi_E \pi_F) \text{ 失效数 } / 10^6 \text{ h} \quad (7)$$

$$\lambda_b = A^e \quad (8)$$

$$e = [(273 + T_{HS}) / N_T]^G \quad (9)$$

查表得: $T_{HS} = 40^\circ\text{C}$, $N_T = 352^\circ\text{C}$, $G = 14.0$,

$$A = 7.20 \times 10^{-4}$$

整流桥:

$$\lambda_p = \lambda_b \prod \pi_i = \lambda_b (\pi_E \pi_Q \pi_T \pi_F) \text{ 失效数 } / 10^6 \text{ h} \quad (10)$$

其中: π_E ——环境系数; π_C ——接点形式及数量

系数; π_F ——电路功能系数; π_{CYC} ——继电器动作速
率系数; π_Q ——质量系数; π_T ——温度系数

3) 接触器环节各元器件应力分析见表3。

表3 接触器环节各元器件应力分析表

元器件	接触器							接线	连接器
π_E	2.0								
π_C	2.0								
π_F	5								
π_{CYC}	3								
数量 N	6	1	14	3	1	7	1	402	2
电流应力比	0.1	0.2	0.3	0.6	0.7	0.8	1		
λ_b	0.006 630	0.006 890	0.007 470	0.011 400	0.013 980	0.017 680	0.030 000		0.001 856
λ_P	0.397 800	0.413 400	0.448 200	0.684 000	0.838 800	1.060 800	1.800 000	0.007 300	0.031 000
$N\lambda_P$	2.387 000	0.413 000	6.275 000	2.052 000	0.839 000	7.425 000	1.800 000	2.934 600	0.062 000
元器件总数:437						$\Sigma\lambda = 24.187 6$			

注:接触器的失效率模型同继电器,即 $\lambda_P = \lambda_b(\pi_E\pi_C\pi_{CYC}\pi_F)$ 失效数/ 10^6 h。

4) 主电路各元器件应力计算见表4。

表4 主电路各元器件应力分析表

元器件	电阻器		调速 电阻器	电位器	整流桥	接线	调速装置	变压器	继电器		
									过流	热	相序
π_E	4.00		2.00	2.00	3.00		1.00	2.00	2.00	2.00	2.00
π_R	1.00		1.00	1.00							
π_V				1.00							
π_Q	0.30		0.03	0.30	0.50		0.50				
π_F					1.00		1.00	4.00	50.00	5.00	5.00
π_T					1.50		1.70				
π_{CYC}									0.10	0.10	0.10
π_C									1.00	1.00	1.75
数量 N	9	1	3	1	2	65	3		1	1	1
$S_{\text{电流}}$									0.5	0.6	0.9
$S_{\text{电压}}$				0.4							
$S_{\text{功率}}$	0.3	0.1	0.8								
λ_b	0.004 100	0.003 500	0.001 100	0.016 000	0.002 100		0.040 700		0.009 620	0.011 000	0.023 075
λ_P	0.004 920	0.004 200	0.000 066	0.009 600	0.018 900	0.004 400	0.034 600	0.000 139	0.009 620	0.011 140	0.040 380
$N\lambda_P$	0.044 280	0.004 200	0.000 198	0.009 600	0.037 800	0.028 600	0.103 800	0.001 112	0.009 620	0.011 140	0.040 380
元器件总数:87						$\Sigma\lambda = 0.289 57$					

注:1) 由于电阻器和电位器的电流是随着电机的转速而变化的,在计算其功率应力比时均按其最不利的情况考虑。

2) 表中 $S_{\text{电流}}$ 代表电流应力比, $S_{\text{电压}}$ 代表电压应力比, $S_{\text{功率}}$ 代表功率应力比;过流、热、相序分别代表过流继电器、热继电器和相序继电器。

$$\text{电阻器 } \lambda_P = \lambda_b(\pi_E\pi_Q\pi_R) \text{ 失效数}/10^6 \text{ h} \quad (11)$$

$$\text{电位器 } \lambda_P = \lambda_b(\pi_E\pi_R\pi_Q\pi_V) \text{ 失效数}/10^6 \text{ h} \quad (12)$$

$$\text{调速装置 } \lambda_P = \lambda_b(\pi_E\pi_Q\pi_T\pi_F) \text{ 失效数}/10^6 \text{ h} \quad (13)$$

其中, π_R ——阻值系数; π_V ——电位器的电压系数

5) 电气控制系统总的工作失效率

由电气控制系统的可靠性模型,则可得到它的工作失效率:

$$\lambda_P = \Sigma\lambda_{\text{PLC}} \cdot \Sigma\lambda_{\text{中}} \cdot \Sigma\lambda_{\text{接}} \cdot \Sigma\lambda_{\text{主}} = 1\,061.7/10^6 \text{ h}$$

$$\text{MTBF}_S = 1/\lambda_P = 942 \text{ h}$$

4 结束语

用元器件计数法和应力分析法得到的结果相差较远,这是正常的,因为前者是在电气控制系统设计初期

对可靠性的大致估算,而后者是在电气控制系统设计后期的可靠性的计算,它较全面的考虑了电、热和机械环境应力等因素对元器件效率的影响,结果较为真实准确^[7]。

参考文献:

- [1] 王锡吉. 可靠性工程技术. 北京: 电子工业出版社, 1995.
- [2] 史定华. 可靠性数学. 北京: 人民邮电出版社, 1989.
- [3] 邱利群, 舒俊辉. 串联系统可靠性模糊优化[J]. 重庆大

学学报, 2002, (7): 20 - 22.

- [4] 黄洪钟. 机械模糊可靠性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [5] 谢开贵, 尹春元, 周家启. 中压配电系统可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2001, (1): 52 - 56.
- [6] 吴波, 黎明发. 机械零件与系统可靠性模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 史进渊, 龚汉声. 基于可靠性理论的故障诊断法的研究[J]. 振动工程学报, 1995, (4):

Reliability of the Electric Control System for QBT80/45 Lifting/Distributing Double-duty Tower Cranes

YAO Jia-fei, WANG Xiao-jing, TUNG Ming-chuo, XUE Da-jin

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The electric control system for QBT80/45 lifting/distributing double-duty tower cranes is studied, and a mathematical model for its reliability is set up according to the study. Numeration and stress analysis of elements are applied to preestimating the reliability of this electric control system in the initial design stage and calculating in the late stage, respectively. The model comprehends the effects of electricity, heat, mechanical stress and other factors on the efficiency of elements in all aspects. Its calculated results are accurate compared with the real data, which demonstrates the electric control system for the double-duty tower crane is of a high reliability.

Key words: double-duty tower crane; electric control system; reliability preestimate; element numeration; element stress analysis

(编辑 陈移峰)

(上接第 62 页)

Mathematical Model of Control Cooling for Screw Rod After Rolling

LV Li-hua¹, CHEN Guo-jin¹, HUANG Meng-ku², WANG Xue-zhu²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Rolling Plant of Xinxing Cast Gap Co. Ltd, Handan 056300, China)

Abstract: The on line hot treatment can not only boost the strength but also gain lower cost. It is usually called tempcore which was developed greatly these years. The process of tempcore art is introduced and the core subject mathematical models is studied. According to the heating exchanging property of screw rod in cooling after rolling. Two mathematical models including beginning cooling model and cooling water amount model are obtained by analysing, deducing theoretically and simplifying mathematically. Its structure is simple and practiced. The parameter of model is obtained from measuring data of work site. It is able to suite the change of work site, so it can be used in practiced controlling.

Key words: mathematical model; screw rod; control cooling

(编辑 李胜春)