

文章编号: 1002-0446(2003)02-0127-05

RPJ-D 型喷浆机器人机械结构及其 分布式计算机控制系统的可靠性设计

周凤余 刘 明 张志献 李贻斌 苏学成

(山东科技大学机器人研究中心 济南 250031)

摘 要: 本文介绍了 RPJ-D 型喷浆机器人的机械机构,重点给出了其分布式计算机控制系统的设计过程.将容错技术、故障诊断技术和抗恶劣环境技术引入喷浆机器人控制系统中,采用不同的冗余配置方式实现了控制系统规划级和控制级计算机系统高可靠性设计.现场应用表明,完全满足了喷浆机器人在恶劣环境下工作的要求.

关键词: 喷浆机器人;容错;故障诊断;可靠性

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

MECHANICAL CONFIGURATION OF RPJ-D AND RELIABILITY DESIGN FOR ITS DISTRIBUTED COMPUTER CONTROL SYSTEM

ZHOU Feng-yu LIU Ming ZHANG Zhi-xian LI Yi-bin SU Xue-cheng

(The Centre of Robot Research, Shandong University of Science & Technology, Jinan 250031)

Abstract: The mechanical configuration and reliability design of its distributed computer control system for the big shotcrete robot(RPJ-D) are introduced. But the latter is the emphasis of this paper. In RPJ-D's control system, the technologies of fault-tolerance, fault diagnosis and resisting the severe environment resistance are used. The high reliability design of its planning level and control level is realized by adopting different forms of redundancy configuration. Field-application indicates that the robot could meet the requirements of the work in wicked circumstances completely.

Keywords: shotcrete robot, fault-tolerant, fault-diagnosis, reliability

1 引言(Introduction)

锚喷支护技术是二十世纪五十年代发展起来的一项新的隧道支护技术.与传统的混凝土整体支护技术相比,锚喷支护具有强度大、开挖量小、支护成本低、围岩自撑支护效能高、支撑厚度薄、施工进度快等特点.但是,直到目前,基本上仍然采用人工喷浆,即由工作人员手持喷枪进行作业.这种作业方式,回弹多,材料浪费严重;工作人员的劳动强度大,作业环境恶劣.受回弹和粉尘的影响,工作人员根本无法保证喷浆工艺的实施,严重影响了工程质量.为了确保喷浆的质量,改善作业环境,减少浪费,采用能够自主工作的喷浆机器人势在必行.在国家 863 计划重大项目的资助下,我们设计制造了 RPJ-D(大

型)喷浆机器人,实现了工程喷浆作业的自动化.本文对该喷浆机器人的机械结构及其分布式计算机控制系统的可靠性设计进行了介绍.

2 大型喷浆机器人机械结构(The mechanical configuration of the RPJ-D)

2.1 机器人总体机械结构

喷浆机器人是一种专用工程化机器人,机器人的机械结构合理与否,不仅关系到其功能能否实现,而且直接影响机器人控制系统的复杂程度,从而决定了机器人的成本和性能.因此,如何根据喷浆作业的工艺要求,合理设计机器人的机械结构,使其能用最简单的动作完成所要求的作业,成为一个比较关

键的问题.我们在充分了解喷浆作业环境和喷浆工艺要求的基础上,摒弃机器人常规结构形式,针对喷浆作业的特点,设计了一种全新的大型喷浆机器人.该机器人的主体结构主要由六大部分组成:运载装置、回转台、大臂、小臂、手腕和喷枪.图1所示为大型喷浆机器人回转台以上部分.

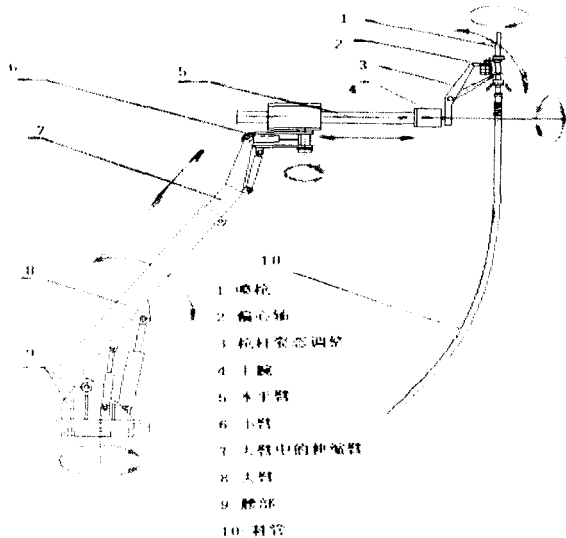


图1 大型喷浆机器人结构示意图

Fig.1 RPJ-D structure schematic diagram

2.2 机械结构的优化设计

以满足机械结构功能要求为目的的机械设计时代已经过去,结构设计不仅要使构件满足实现其工作原理的要求,还要顾及诸如力学、工艺、装配、美观、成本、安全等众多其它要求和限制.在现代机械设计中,后者越来越重要,并直接关系到产品的质量和市场竞争力.因此,对喷浆机器人的本体进行优化设计是十分必要的.

基于模拟自然和遗传的随机搜索算法——遗传算法(GA)可以从整个可行解空间寻找最优解,避免了局部最优现象,而且当群体规模足够大及遗传代数足够多时,总能得到问题的最优解.因此,我们采用遗传算法(GA)对机器人机械结构、驱动装置、传动机构等进行了优化设计,在完全满足喷浆作业需要的基础上,使机器人结构更加紧凑、油缸安装更合理、精度更高.

3 分布式计算机控制系统的容错设计 (Fault-tolerant design of RPJ-D's distributed computer control system)

喷浆机器人是一种适应于工程隧道锚喷支护的具有一定智能的机器,对于这种特殊的工作环境,要

求喷浆机器人具备自动轨迹控制和主从遥控操作控制两种工作方式,同时根据喷浆工艺要求,控制系统应具有综合决策、系统协调、运动轨迹示教再现、伺服控制等功能,并具有在恶劣环境中可靠工作的能力.为此,采用冗余技术、故障诊断技术、防潮技术、抗热技术、抗震技术、耐腐蚀技术等设计出具有高可靠性的多级分布式容错控制系统,其结构如图2所示.各个控制单元之间通过纠错能力强、可靠性极高的CAN总线交换信息.

3.1 规划级容错设计

规划级由自动规划控制器节点和示教操作器节点组成.

3.1.1 示教操作器的设计

示教操作器的主要任务是:

- ① 遥控主从控制操作;
- ② 遥控主从/自动轨迹控制的转换控制操作;
- ③ 液压泵站、喷浆泵、速凝剂泵控制操作;
- ④ 完成轨迹示教.

示教操作器的设计,充分考虑了它的实用性、防护性和可靠性,特别是考虑到作业环境恶劣和操作工文化水平一般比较低的实际情况,优先保证牢固、抗振、抗冲击、防水、防尘、醒目、易懂、便于联想等使用性能,并能够完成远距离遥控和车内控制.操作器为可动部件,通过双绞屏蔽再屏蔽电缆与控制机箱相连.配有自检及故障诊断程序,故障时,提示用户及时处理.

3.1.2 自动规划控制器结构设计

自动规划控制器是喷浆机器人自动轨迹控制系统的核心,一旦它出现故障,自动轨迹控制将无法进行.为保证其可靠性,采用冗余配置方法,进行容错设计.综合各种因素后,选择了结构简单、性价比高的双机容错系统,结构如图2虚线框内所示.

自动规划控制器选用2个Intel 80C196KC 十六位单片机A,B作为核心,组成双机容错系统.当然,如果简单地把两机凑在一起是无法工作的.因为当一台机器出了错误时,两机输出不同,但这并不能判断哪一台出了故障,因此,该控制器还必须具有故障诊断和仲裁切换功能.

3.1.3 故障诊断

在自动规划控制器中,主要故障有:RAM故障、EPROM故障、串行口故障、CPU故障、程序执行故障等.对于前3种故障,利用软件诊断完成,并将结果送仲裁器.后2种故障,则利用单片机本身所提供的信号和功能,配以简单电路组成故障诊断系统对

其进行检测. CPU 工作正常与否直接由硬件诊断模块对芯片的 RD 信号进行监视. 在 CPU 工作正常时, 不断交替进行读写操作, 该信号呈现出高低电平的交替变化. 如该信号长期无电平变化, 则 CPU 工作异常, 此时诊断模块输出故障信号给仲裁器. 程序执行故障由软件故障诊断模块来检测 CPU 芯片的 RESET 信号的变化. 在正常工作时, 该信号处于高电平, 只有在上电、手动复位、WDT 溢出、执行指令

RST 的情况下, 该信号被钳位到低电平. 在系统中设置特征标志, 以区别正常复位和故障复位, 其方法是: 在复位后, 通过特征标志判断是否为正常复位, 是则清除记忆单元中的记录数据; 否则, 记忆单元记录数据加 1, 数据达设定值后, 软件故障诊断模块输出故障信号给仲裁器. 当仲裁器接到上述故障信号时, 切换掉故障机, 使备用机投入工作.

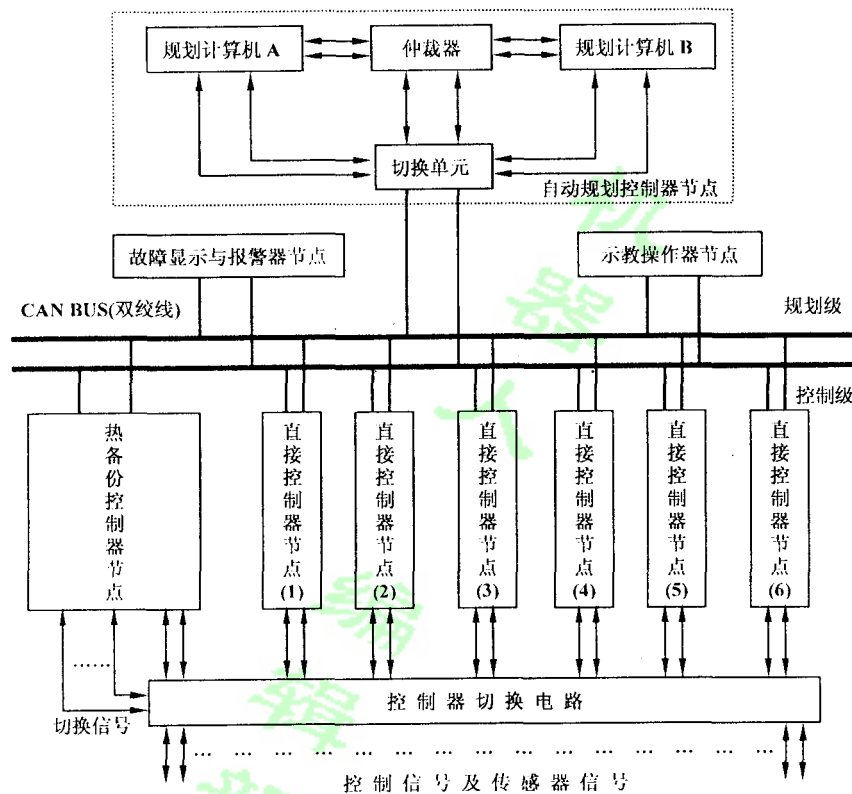


图 2 分布式计算机控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of distributed computer control system

3.1.4 仲裁器设计

仲裁器的作用是: (1)完成自动规划控制器 A, B 双机运算结果比较; (2)实现 A, B 双机周期性同步; (3)A, B 两机超时判断; (4)控制切换单元切换故障机. 仲裁器由 2 片 AT89C52 Flash 单片机构成故障安全的双比较系统. 采用双轨比较原理进行检错、纠错和选择输出, 其工作原理是: 自动规划控制器的 A, B 双机运算完成后, 把结果分别送到各自的并行输出接口上, 待数据就绪后, 向仲裁器发出中断申请信号, 仲裁器的双比较系统接到 2 个申请信号后, 启动各自的比较程序. 对 A, B 两机的运算结果进行比

较, 若双比较器比较结果均一致, 表明系统无故障, 自动规划控制器的 A, B 双机仍按原状态工作; 若比较器的结果均不一致, 表明自动规划控制器的双机出现故障, 仲裁器发出指令, 使双机停止执行工作程序, 转入故障诊断程序, 进行故障自诊断, 并将诊断结果通知仲裁器, 由仲裁器将故障机切除, 自动规划控制器降为单机工作; 若双比较器中的一个比较器的结果正确, 而另一个比较器的结果错误, 则表明后一个比较器有故障, 令其进行故障诊断, 判断为瞬间性还是永久性故障, 若为永久性故障则将其切除, 仲裁器的双比较系统降为单比较系统工作. 系统对上

述所有工作状态实时监控并给出指示。

3.2 控制级容错设计

3.2.1 控制级结构

控制级的主要任务是根据规划级发来的控制指令,完成各自由度的运动控制,从而实现喷浆机器人的运动轨迹控制。

为了提高控制级的可靠性,控制级采用 N 中取 K 容错结构。喷浆机器人有:腰部旋转、大臂俯仰、大臂伸缩、小臂伸缩、手腕转动和喷枪姿态调整等 6 个自由度。在控制级中设计了 6 个自由度控制器,外加 1 个备用控制器(如图 2),一旦某一自由度控制器出现故障,备用控制器立刻代替故障机工作,使系统的工作不至于停顿。

在控制级的设计中需注意 2 个关键性问题:(1)备用控制器的通用性;(2)各控制器的故障诊断及故障机切换。

3.2.2 备用控制器的通用性

各自由度控制器的硬件参数基本一致,只是通道中的放大倍数和软件中的控制参数不同,所以在备用控制器中把通道中的放大器设计成程控放大器,把各自由度控制器的控制参数存入备用控制器中,当某控制器发生故障时,根据故障信息,由规划级确定故障控制器的地址代码,并告知备用控制器,备用控制器首先将故障控制器切除,然后选择相应

的放大倍数和控制参数,代替有故障的控制器工作。

3.2.3 故障诊断及切换

单片机系统故障诊断方法同规划级,同时,根据控制器的特点增加了传感器断线,输入通道,输出通道,功率放大器等故障的诊断功能。一旦某控制器诊断出故障,立刻告知规划级请求切换,当规划级接到请求信号,即作出相应的信号处理,切除故障机,并使备用控制器代替其工作。输出通道切换由继电器来完成,各自由度控制器无故障时,利用继电器的常闭触点接通输出通道,即在控制级正常时,继电器不必通电工作,只有在控制器出现故障时,相应的继电器才通电工作。这样使用继电器,大大减小了继电器的可靠性对整个系统可靠性的影响。

3.3 系统的可靠性分析

3.3.1 自动规划控制器双机容错系统的可靠性分析

设自动规划控制器每个单机系统的故障率为 λ ,可维修率为 μ ,若不采用容错设计,维修只能提高系统的利用率,并不能提高系统的可靠性,因此,单机系统的可靠度为 $R(t) = e^{-\lambda t}$,平均无故障时间为 $t_p = 1/\lambda$ 。

根据自动规划控制器计算机系统所采用的容错系统的结构,可绘出其可靠度的马尔可夫模型,如图 3(a)所示。

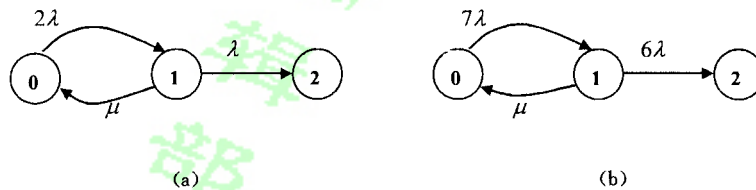


图 3 可靠度的马尔可夫模型
Fig. 3 Reliability of Malkov model

由图 3(a)可得它的微分转移矩阵 T 及系数矩阵 A 分别为

$$T = \begin{bmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & -\lambda - \mu & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} S + 2\lambda & -2\lambda & 0 \\ -\mu & S + \lambda + \mu & -\lambda \\ 0 & 0 & S \end{bmatrix}$$

由于系统的各状态转移率为 $p(s) = p(0) \times A^{-1}$,系统最初投入使用时 $P(0) = [1 \ 0 \ 0]$,可得两机都失效的转移率为

$$P_2(S) = \frac{2\lambda^2}{S(S + S_1)(S + S_2)}$$

其中 $S_{1,2} = -\frac{3\lambda + \mu}{2} \pm \frac{\sqrt{\lambda^2 + 6\lambda\mu + \mu^2}}{2}$.

因此系统的可靠性函数为

$$R(t) = 1 - P_2(t) = \frac{S_1 e^{S_1 t} - S_2 e^{S_2 t}}{S_1 - S_2}$$

在一般的情况下, $\mu \geq 10\lambda$, 上式可简化为 $R(t) = \frac{e^{-2\lambda t}}{3\lambda + \mu}$, 双机容错系统的平均无故障时间可达 t_p

$$= \int R(t) dt = \frac{3\lambda + \mu}{2\lambda^2}, \text{ 远远大于单机系统.}$$

3.3.2 控制级计算机系统的可靠性分析

如果不允许采取冗余技术,6 个控制器中的任意一个出现故障都将导致整个系统的失效,这种系统属于串联结构.若控制器的故障率为 λ ,可维修率为 μ ,则系统的可靠度函数为 $R(t) = e^{-6\lambda t}$,平均无故障时间为 $t_p = \frac{1}{6\lambda}$.

当采用 7 中取 6 容错结构以后,系统可靠性的马儿可夫模型如图 3(b)所示.按 3.3.1 节的计算方法可得控制级的平均无故障时间为 $t_p = \frac{13\lambda + \mu}{42\lambda^2}$,可见采用容错技术后,系统的可靠性大大提高.

4 控制系统抗恶劣环境设计 (Design of resisting the wicked circumstance of the RPJ-D control system)

作为一个工业产品,如何能在特定的环境中,长期、持续可靠地工作是头等重要的性能指标.喷浆机器人工作环境恶劣,车载控制系统要经受严寒、湿热、暴晒、淋雨、灰尘,及机械振动、噪声等的影响,因此,对控制系统进行抗恶劣环境设计是确保机器人长期可靠运行的关键.主要包括热设计技术、抗震动和抗冲击技术、三防技术等.

4.1 控制系统热设计

控制系统的热设计包括三个方面:器件、印制板、机箱.

在选择系统器件时,从器件失效率与环境温度的关系入手,选择可靠性高的军品器件;印制板采用四层板,元件面设计有导热铜条和散热金属(铜)层;为抗潮湿和酸雾的侵蚀,机箱采用全封闭双层机箱,内层与外层之间为冷板结构.发热元器件跨骑在导热条上,导热条将发热器件的大部分热量传导至印制板两侧金属楔形块,再经楔型导轨传到机箱的冷板结构,冷却气流穿过冷板将热量带走.由于冷板散热面积较大,冷却效果较佳.并因为冷却气流不与机箱内部接触,冷却气流中的杂质灰尘和水气对控制系统无什么危害,容易达到“三防”要求.

4.2 控制系统三防设计

由于湿热、酸雾、霉菌三种环境因素对电子产品有较大影响,为了使控制系统适应恶劣的工作环境,我们采用了如下三防措施:

(1) 为了防潮,所有插接件及其器件按 MIL-I-

46058 进行保护涂覆;机箱铝制件均按 MIL-C-5541 镀铬;机箱外表面按 MIL-E-5556 油漆.

(2) 为了防酸雾和灰尘,全部控制器件密封在机箱体内,采用热传导散热,冷却气流与内部空气不发生交换,因此可以避免酸雾和尘埃在器件上的积存.

(3) 在控制系统中,采用非霉菌营养的材料.

4.3 控制系统抗震动抗冲击设计

采用的主要技术有:隔离技术、去耦技术、阻尼技术和刚性化技术.

4.4 控制系统的抗干扰设计

对于工作在恶劣环境中的喷浆机器人控制系统进行抗干扰设计是非常必要的.在控制系统电路设计中,广泛采用了滤波、屏蔽、隔离等措施;在软件设计中采用了指令复执、程序卷回、软件陷阱、存储器故障诊断等措施,极大地减小了噪声、振动、电磁、电网波动等对控制系统的影响.

5 使用效果及今后的任务 (Use and task for the future)

大型喷浆机器人在中铁十九局承担的昆明—石林高速公路阳宗隧道使用一年来的实践表明,它完全能满足大型隧道喷浆的要求,具有操作方便、灵活、安全、可靠,工作效率高、回弹少等优点,受到了隧道工程人员的欢迎.目前,我们正在加大力度,致力于喷浆机器人的系列化及配套工作.

参考文献 (References)

- [1] 日本机器人学会编.宗光华等译.机器人技术手册.北京,科学出版社,1996:677-681
- [2] 向婉成,陈依林.双机冗余功能控制器的开发研究.仪器仪表学报.1992,13(2)
- [3] 孙迪生,王炎编.机器人控制技术.机械工业出版社.1997.4
- [4] 张松春等.电子控制设备抗干扰技术及其应用.机械工业出版社.1995.9

作者简介:

周凤余 (1969-)男,副教授.研究领域:特种机器人,智能机器人的研究、开发及应用.

李贻斌 (1960-)男,教授.研究领域:矿山机器人,智能控制等.

苏学成 (1940-)男,教授,博士生导师.研究领域:自控理论及系统,机器人技术及微机控制等.