

KEK同步加速器计算机控制系统

易允文 吴国有 尹朝万

(中国科学院沈阳自动化研究所)

日本高能物理研究所(简称KEK), 建立于1971年4月, 它是日本高等学校和研究所的科学家开展高能物理研究的一个实验中心。现拥有一个12兆电子伏特(Gev)质子同步加速器和几座物理实验大厅。从1976年3月首次得到8Gev束流, 次年5月开始物理实验, 现在能量已达到12Gev, 流强为 2×10^{12} 质子数/脉冲, 提供给泡室和计数器实验厅开展物理实验。我们三人于1979年在KEK加速器部对计算机控制系统进行了为期二个月的考察。现将加速器中央计算机控制系统、计算机软件以及主环加速器磁铁电源的计算机控制介绍如下。

一、中央计算机控制系统

(1) 概况

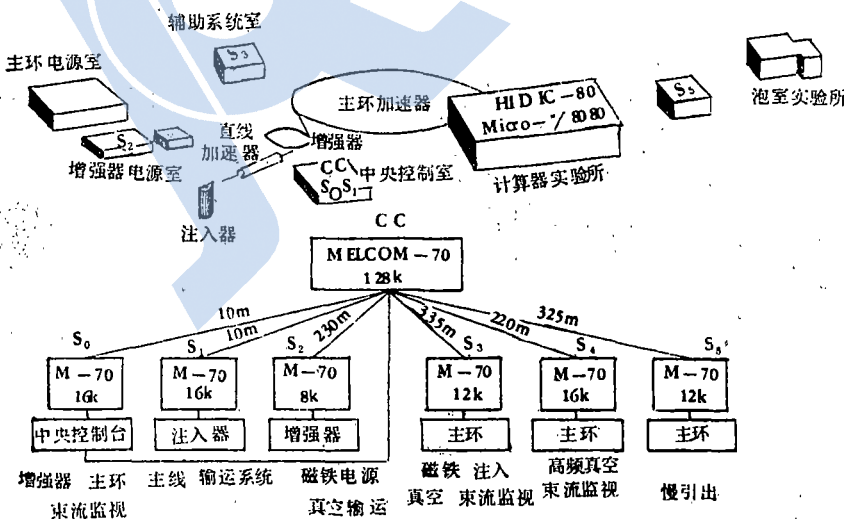
KEK同步加速器由四段加速器组成: 750 Kev高压倍加予注入器、20Mev直线加速器、500Mev增强器和12Gev主环同步加速器。检测点就按装在这些加速器的附近。计算机系统按二级递阶网络设计, 计算机直接接到高速数据线上。计算机网有一台中央计算机(CC),

一台软件发展计算机(SD)和六台卫星计算机($S_0 \sim S_6$)。中央计算机和其他七台计算机是通过连接单元(CLU)连接的, 卫星计算机分别担负加速器各部分的数据采集与控制。中央计算机及卫星计算机的位置分布及其功能示于图(1-1)。

(2) 计算机网硬设备

计算机系统的结构: 计算机网由8台MELCOM-70计算机组成, 如图(1-2)所示。中央计算机内存为128K字, 还有一个盒式磁盘以及为了软件研制, 数据记录及信息显示的外围设备。卫星计算机内存最大为16K, 各有一个过程输入输出控制器和一个等离子显示操作台。

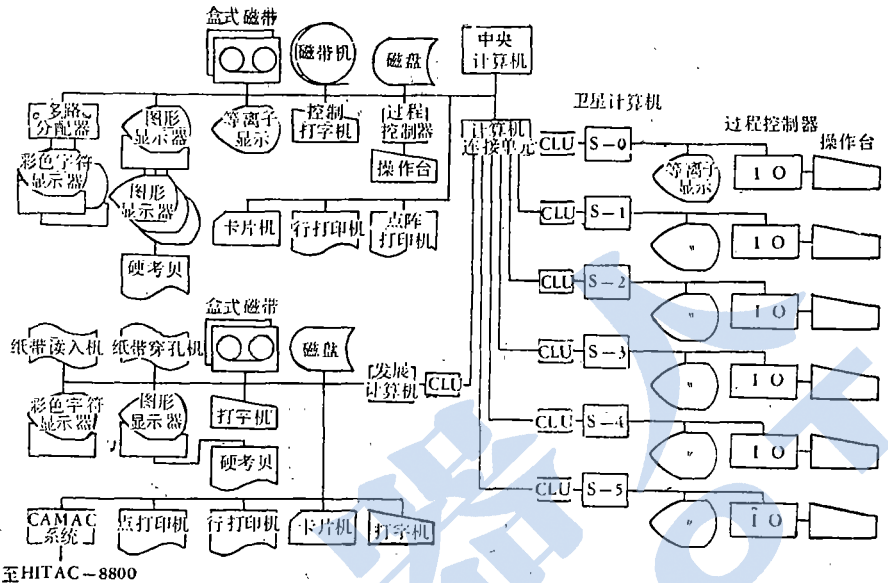
通信接口单元: 中央计算机和卫星计算机之间数据交换是用半双工高速并行数据总线进行通信的。数据按8位字节交换, 传送速度为



图(1-1) 中央及卫星计算机分布及功能

100K 字/秒, 计算机间的传输距离最长可达 33. 米。

过程输入输出接口: F.E.A. 的过程接口有中断输入、数字输入、数字输出、脉冲输出、模拟输入和模拟输出数种。一般认为用 CA-AC 系统比较合适, 但是在日本价格太贵了, 所以在加速器控制系统里没有采用 CAMAC, 只是在物理实验部用了 CAV-



图(1-2) 加速器计算机控制系统机图

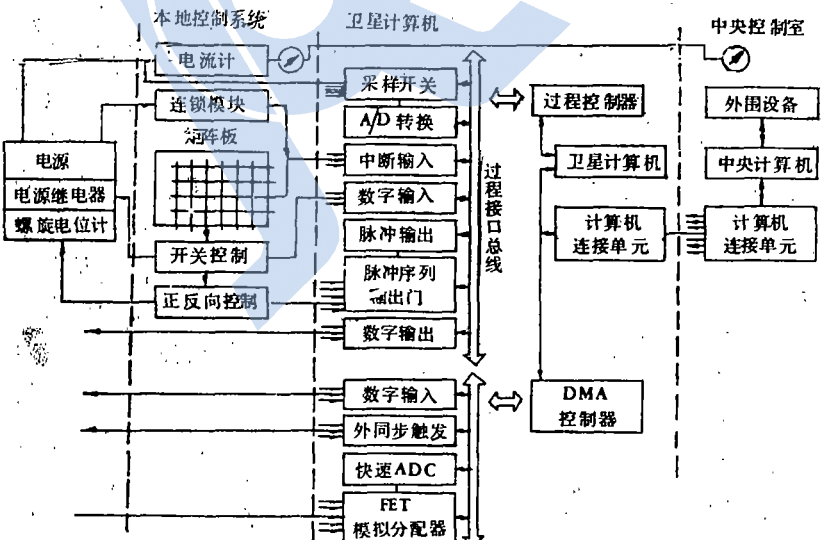
AC 系统。过程接口功能插件做成标准形式, 插到控制器的接口母线上, 控制器再接到 ELCO 7-70 的入/出通道的程序控制器上。束流发散度、剖面、强度和位置等探测器的快速参数测试, 则通过 DMA 直接和内存交换数据。卫星计算机的过程接口原理如图 (1-3) 所示。

运行时操作人员在中央控制室对加速器各部分进行监视和控制, 卫星计算机采集的数据集中在中央计算机处理、显示和记录。设备的运行状态及主要运行参数通过中央闭路电视进行监督。KEK 中央控制室概貌见图 (1-4) 照片。

(3) 中央控制室

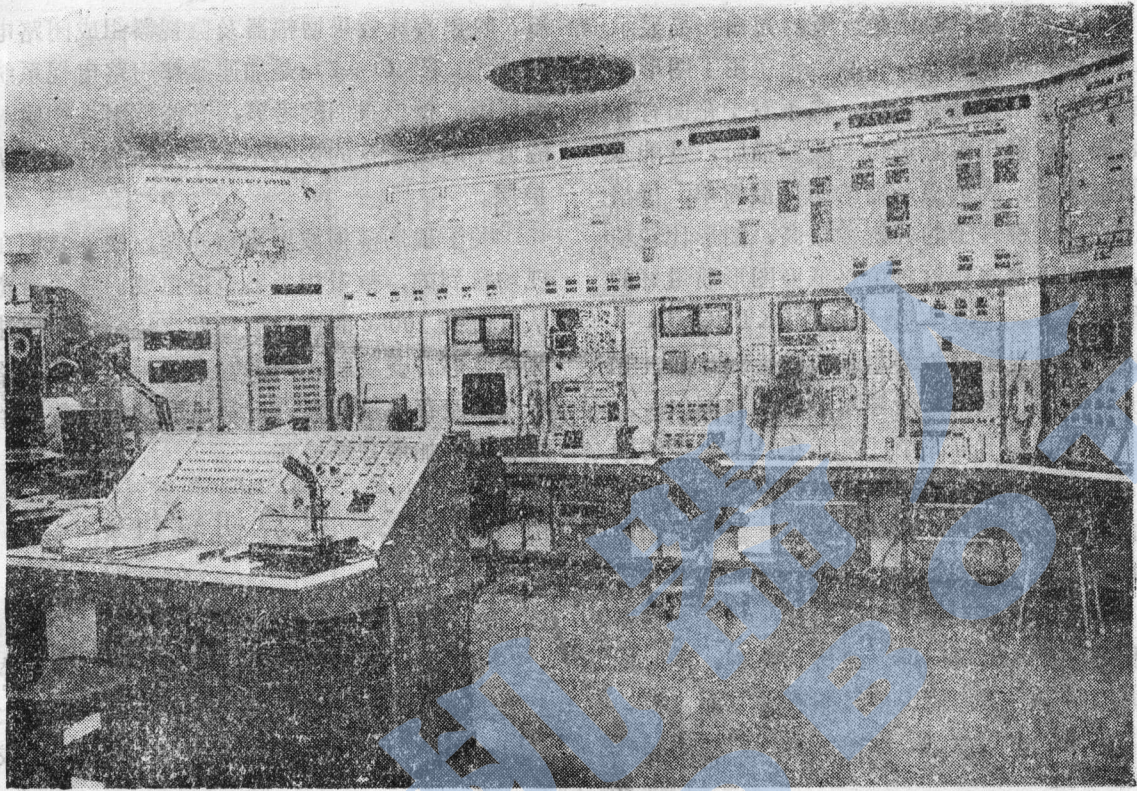
中央控制室是加速器控制的中心, 正常运

1979 年他们设计了一个新的中央控制台, 最近将投入使用, 他们采用了国际上流行的设计思想和日本的最新设备, 正常运行包括启动和停车均在这个控制台上进行。中央控制台由三张相同的台子组成, 上面安装了存储管图形显示器, 彩色字符显示器, 触摸板和轨迹球等设备。它们通过标准接口单元和中央计算机接起来, 如图 (1-5) 所示。

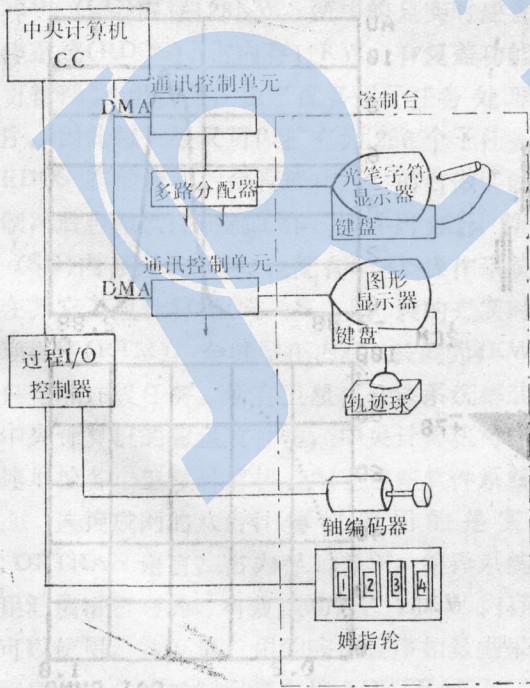


图(1-3) 控制系统接口方框图

这里提一下触摸板 (TOUCHPANEL)。所谓触摸板就是在一个显示装置上蒙上一层有触摸敏感材料的透明薄膜, 只要手指轻轻接触一下, 就将接触处的信息传给计算机。近年来一些大的计算机控制系统都采用



图(1-4) 加速器中央控制室一角



图(1-5) 中央控制台连接单元

这类装置做人机联系工具。KEK的触摸板是用透明有机玻璃做的，上部有16个小方格，每个方格上用文字写明分类名称，所以一个方格代表一个分类项。如果要找某一分类项的操作内容时，你用手指轻轻地触摸一下某一小方格，计算机立即把某一分类项的目录在显示装置的下半部全部显示出来，(这个装置一个分类项最多有96个目录)。然后到下半部去找你要的操作目录，在找到的地方再用手指轻轻摸一下，计算机就立即去执行你的操作。这种先进的技术使操作人员在相当小的工作面(2米×1米)范围内，即可按地区、功能迅速的从成百或成千个目录中找到你要求查看或改动这些参数的数值，计算机自动引导你去执行你要执行的操作而不会产生差错。在触摸板附近有一个显示屏可以很形象地表示各种操作情况，好比你亲临现场操作一样。这样一种极为便利的人机通信工具，并不要求操作人员对计算机了解很多。

彩色字符显示器就是一般的光栅扫描显示器，带有光笔和键盘。控制台上还用了图形显示器，它是用存储管做的，由于管子靶面有存储效应，计算机对它进行一次扫描后，就能永久保留图形，因而显示器的结构很简单，价格也便宜。这种管子的分辨率较高，图形比较精密。在KEK普遍用这种价格低廉图形质量好的图形显示器，它们的型号是TEKTRONIX—4010。图形显示器主要用于束流性能诊断，如束流发散度、束流剖面等图形显示。图(1-6)为硬拷贝复制出来的预注入器束流发散度的图形，可以看出图形呈现立体感。硬拷贝是和图形显示器相匹配的，通过扫描转换器把显示器上的图形复制出来的。

闭路电视系统用于对隧道中某些重要设备以及对隧道进出口门的安全进行监视，同时把中央控制室的工作情况传递给有关方面监视。KEK采用了由摄象机、图象综合器，映象切替

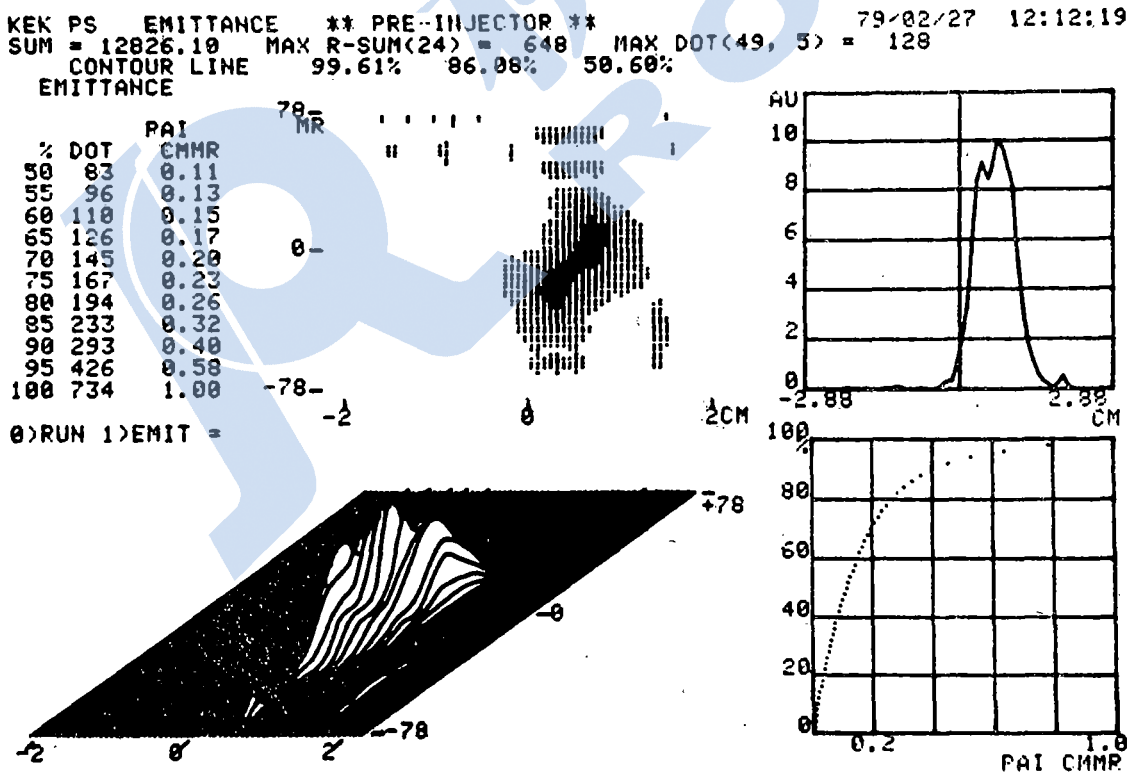
器、映象特殊效果增幅器及监视器组成闭路电视系统。图(1-7)是加速器部闭路电视系统原理图。根据我们的考察，高能放射性物质对隧道中的摄象管的影响不大，无须加特殊的防护层。

关于现场模拟波形观察问题，根据我们在现场看到的，数量相当多也很重要。除了带宽从直流到100kc的模拟信号外，还有一些快速脉冲波形需要观察。KEK普遍采用50MC多路示波器及存储示波器。信号用同轴电缆传输，两端均不加增益转换器。

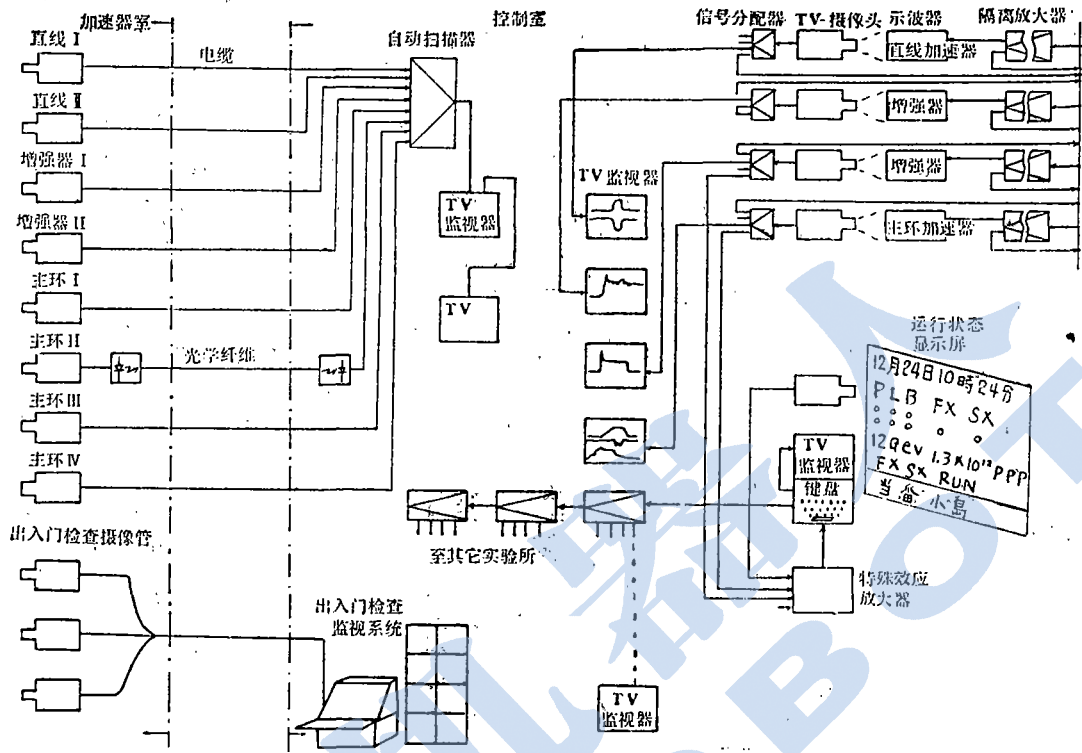
二、计算机软件

(1) 计算机软件产生及其特点

KEK所用计算机类型较多，系统软件基本上是由计算机公司提供的，在不同类型机种上所用的操作系统和算法语言也不尽相同。连成



图(1-6) 预注入器束流发散度显示



图(1-7) KEK加速器闭路电视系统

机网的八台MELCOM—70S计算机中，中央计算机(CC)内存128KW，使用的是实时磁盘操作系统(RDOS)，占内存12KW，有复盖功能，可管理16级任务，由于配备了子任务处理程序，因此每一级又可以扩充为256个子任务。RDOS有前台和后台管理功能，前台做实时控制，后台做软件研制工作。软件研制计算机(SD)内存为32KW，也配有RDOS操作系统。在其它卫星计算机(S₀—S₆)上，装的是实时管理程序(RTM)，全驻留在内存，长度为4KW，只管理16级任务。所有卫星机软件系统都装在中央计算机的磁盘文件里，中央计算机可以快速地给各个卫星计算机装配上这些软件系统。

连接成网的八台计算机使用的是实时FORTRAN语言，占内存24KW，编译系统是用汇编语言写的，有复盖功能，16KW内存就可以使用。各卫星机里的应用程序如数据采集程序，设备的控制程序有用FORTRAN IV，也

有用汇编语言写的，束流特性等显示程序大部分是用实时FORTRAN写的。这些程序在CC机和SD机上调好后，用二进制的结果程序装配到各卫星机里。这样卫星机里的软件系统一旦装上就可以立即运行。

为了适应加速器控制的需要，KEK对系统软件如中央计算机的RDOS，各卫星机里的RTM均做了一些修改和补充。在CC机里增加LCP程序，占有4KW内存。主要功能是处理计算机和终端交互问答，控制换行换帧面。例如从键盘往计算机输入，当输入字符大于一帧时，此程序控制满一帧，把这一帧画面存入计算机内存，然后回车换行，再从初始位置开始输入剩余的字符。LCP程序也完成帧与帧之间进入计算机内存以后的连接和放置的处理等功能。SCP程序，占有4KW内存，主要做图形显示的一些控制。三菱公司为MELCOM—70s计算机配了图形显示软件库，包括很多图形显示

的子程序，这些子程序可以直接由 FORTRAN 语言调用。SCP 程序完成显示子程序的调入调出，流程控制，一些计数器的增减等功能。分时系统执行程序 (TSS)，占有 6 KW 内存。三菱公司为 MELCOM-70s 计算机做的 RDOS 没有分时系统，KEK 的中央计算机配了四台字符显示器和二台图形显示器，这就存在分时操作问题，六个显示终端分时操作的时间间隔为 200ms，该程序就是完成这方面的功能和控制。其中央计算机内存分配图如(2-1)所示。

0	实时磁微操作系统 RDOS/T 外设管理 程序 MONITOR	16KW
	LCP	4KW
	SCP	4KW
	TSS	6KW
	前台任务、数据区	18KW
	后台任务工作区	16KW
	M _{3,5} TSS-1	8KW
	M _{3,45} TSS-2	8KW
	M _{3,45} TSS-3	8KW
	M _{3,45} TSS-4	8KW
	GDP TSS-5	16KW
128k	GDP TSS-6	16KW

图(2-1) CC机内存划分图

(2) 计算机软件的种类和功能

卫星计算机 S₀—S₅ 要直接和加速器设备连接，通过计算机达到对设备的控制和对束流特性的调整。所以控制程序基本上使用汇编语言，这些程序直接存取设备状态（数据采集等），满足了执行要快的特点。束流特性的显示程序基本上是用实时 FORTRAN 写的。

共有三种库程序：

FORTRAN 程序库：支持 FORTRAN 正常运行，由方便用户的各种功能子程序汇集而成。

显示程序库：把图形显示器的一些基本显示功能，写成一些标准的显示子程序，然后按功能定义成带有参数的特定名字，这些名字可以直接由 FORTRAN 语言调用。这些子程序使

用和功能详见名称为 GDI—TCS 显示库使用说明。

KEK 程序库：为适应过程控制的需要，编写了许多专用子程序，如数字量输入输出子程序；模拟量输入输出子程序；开关量输入输出子程序；不同用途的一些标度变换与计算子程序等。

有了这些完备的程序库，那么，在中央计算机上编写束流特性显示程序就很容易了。

例如，在中央计算机上显示束流特性程序有：

LEBT：低能输运段束流发散度测量显示程序。

SSBT：主环束流位置测量及显示程序。

ATQM：自动 Q 值测量显示程序。

MINT：主环束流强度测量显示程序。

(3) 控制程序的工作方式

KEK 现在还没有全部做到闭环控制，其中大部分显示束流特性的程序是单独方式工作的，就是说启动某个程序时，该程序才工作。我们举增强器到主环束流运输线上调整磁铁电源、电流值来说明控制程序是如何工作的。

设 C_p 为磁铁电流的当前值。

C_N 为新设定的磁铁电流值。

$R = C/P$ 比例系数。

P 由卫星机 S_2 输送到设备上去的脉冲步数。

使用迭代公式计算：

$$P_0 = \frac{C_N - C_p}{R}$$

$$P_0 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{磁铁电源}$$

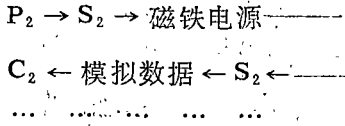
$$C_0 \leftarrow \text{模拟数据} \leftarrow S_2 \leftarrow$$

$$P_1 = \frac{C_N - C_0}{R}$$

$$P_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \text{磁铁电源}$$

$$C_1 \leftarrow \text{模拟数据} \leftarrow S_2 \leftarrow$$

$$P_2 = \frac{C_N - C_i}{R}$$



控制循环，检查精度：

当 $\Delta C = |C_N - C_i| \leq \text{Limit}$ (容限)。表示新值已达到，做输出、显示、重新输入等处理。

当 $P_i = 0$ 时，做输出、显示等处理。

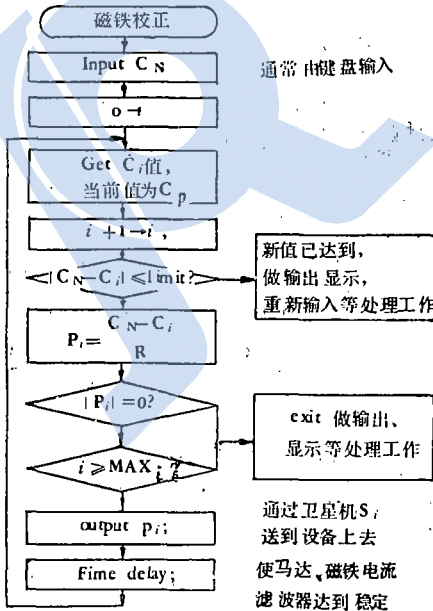
$i \geq \text{MAX}_i$ 重新试调记数器，凭经验设定值，防止死循环发生。

程序流程图如图 (2-2) 所示。

(4) 中央计算机 CC 和各卫星机 S_n ($n = 0, \dots, 5$)

数据传输方式

中央计算机和各卫星计算机之间通讯有二种方式：数据传输方式和命令传输方式。数据传输方式是一个计算机的内存对另一计算机的内存，通过DMA直接进行读和写交换，数据交换缓冲区地址是固定的，缓冲区状况由程序检



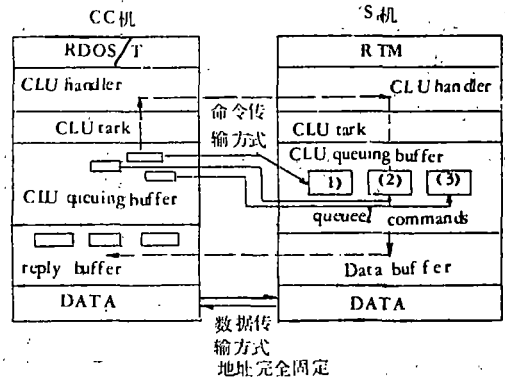
图(2-2) 调整磁铁电流流程图

查。数据传输采用快速并行传输方式，传输率是100KW/sec。被传输数据先分成块，每块再八位并行传送。为了保证传输的正确性，每八位用奇偶校验法检查，每块结束用冗余数检查。

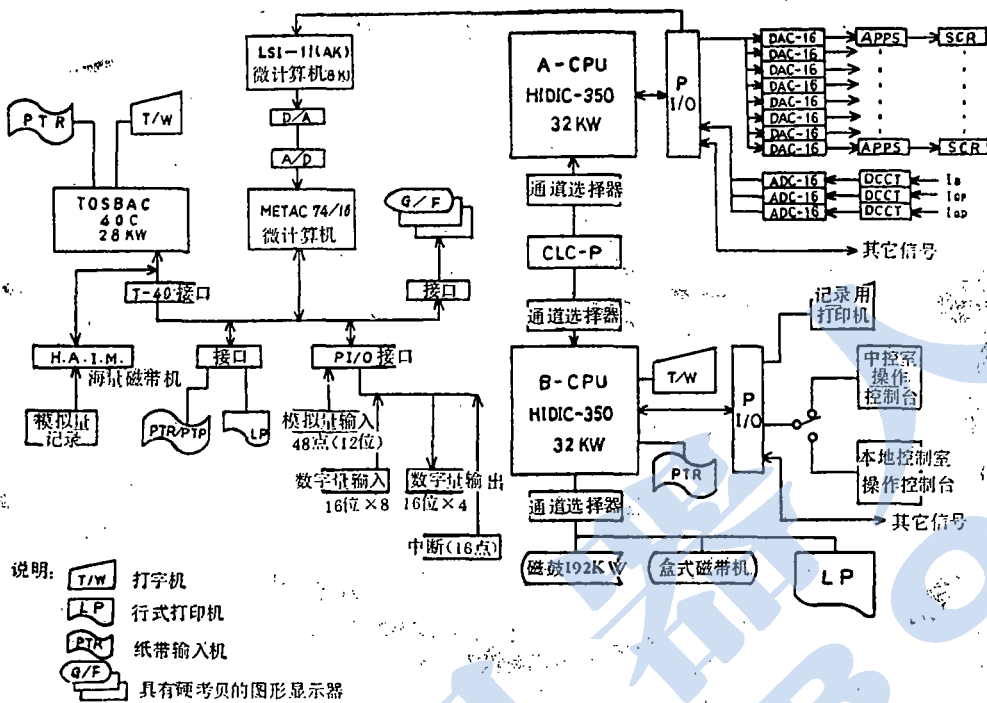
命令传输方式是从键盘向 CC 计算机里打命令，CLU (Computr Link Unit) 处理程序对打入的命令在CLU排队缓冲区排队，中央计算机的CLU处理任务程序按排队顺序分析已排队的命令，并送往卫星计算机的缓冲区。在卫星计算机里对进来的命令由CLU处理任务程序分析命令，并送往 S_n 的CLU排队区逐个执行。 S_n 通过过程输入输出接口取得模拟量，再送回中央计算机，中央机输出脉冲数据到卫星机的缓冲区；卫星机输出数据到设备上；把回答信息再送回到中央计算机。其简要过程如图 (2-3) 所示。

通过对KEK的考察，我们觉得对过程控制有一个较好的高级算法语言，对写控制程序是很必要的。在 CERN用的是具有交互、解释性的 NODAL 语言，对用户非常方便。KEK尚未搞自己的算法语言，但KEK从实际出发建立适合自己需要的数据库，在此基础上，用实时 FORTRAN, FORTRAN IV, 汇编语言等写控制程序也是完全可以的。

KEK由于用的计算机机种较多，系统软件不统一，给写控制程序，软硬件的交流带了许多不方便之处，这是搞系统设计应尽量避免的。



图(2-3) 命令传输方式流程图



图(3-1) 主环磁铁电源计算机控制结构图

三、主环磁铁电源 计算机控制系统

(1) 概况

磁铁电源控制系统是加速器的一个重要控制系统, 相对说来系统比较大, 也比较复杂。KEK的磁铁电源控制系统在设计上有些特点, 这里加以详细介绍。

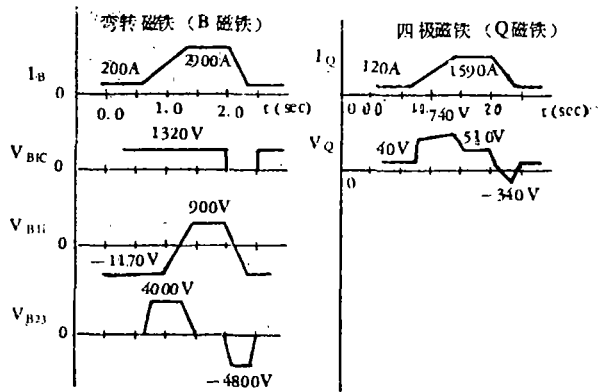
控制系统由五台小型和微型计算机组成, 系统结构图如图(3-1)所示。控制B、Q_F和Q_D磁铁的三台磁铁电源。磁铁电源的稳定度在注入和平顶段时分别要求小于 10^{-3} 和 10^{-4} , B磁铁和Q磁铁之间的跟踪误差要求小于 $\pm 3 \times 10^{-3}$ 。图(3-2)为B磁铁和Q磁铁运行的典型曲线。

电源系统由串联12相可控硅整流器SCR组成。SCR整流系统包括有设定可控硅点火角的自动脉冲相移器(APPS)和自动电压调节器(MAVR)。计算机控制系统提供电压曲线给

MAVR, 并且经直流电流变换器(DCCT)检出磁铁电流加到自动电流调节反馈回路(ACR)。两台HIDIC-350安装在电源控制室, 其中(A-CPU)主要作控制用, (B-CPU)功能是监视和完成后台任务。

(2) 硬件

控制计算机(A-CPU)内存容量为32K, 通过过程输入输出接口(PI/O)作用到MAVR,



图(3-2) 12GEV运行的典型曲线

这台计算机主要起控制作用，因此外部设备不接在该机上。

并行通信联结控制器 (CLC—P) 使 (A—CPU) 和 (E—CPU) 互相联接，进行数据通信，其数据传输速度约为 40K 字/秒。

直流电流变换器 (DCCT) 共有三个，用于检出 B 、 Q_F 和 Q_D 的磁铁电流，其输出端的内在噪声利用低通滤波器衰减，不会影响电流控制。

模数转换器 (ADC) 为 16 位，具有很高的分辨率，对于 B 磁铁电流是 0.53 安/位， Q 磁铁电流是 0.031 安/位。

数模转换器 (DAC) 也是 16 位，和 ADC 一起安装在有温度控制的小匣内。

监视计算机 (B—CPU) 主要功能是执行来自操作台和外部设备的输入命令，实时操作系统用磁鼓存储器，离线辅助存储器则利用盒式磁带机。有两个操作台通过 P I/O 接口接到 (B—CPU)，分别安装在电源控制室和中央控制室，能控制运行、启停、注入电流跟踪值微调以及曲线和参数的显示等。

(3) 软件

MIDIC—350 计算机的操作系统是过程监督系统 (PMS—II)，它是发展了的在线实时操作系统。这个系统的源程序用汇编语言、FORTRAN 和 FCL 语言。

在电源控制系统中控制程序位于 (A—CPU) 的磁心存储器里，它是 PMS—II 管理下的一个优先任务，所以当这个程序运行时，PMS—II 不接受中断信号。这个程序由 14 个子程序组成，按控制时间表执行。

电压曲线和电流反馈的控制周期是 10 毫秒见图 (3—3)，周期数值的确定是通过电源

控制系统的数字模拟实验得到的。目前的控制时间是用计算机的内部时钟，将来要用同电网锁相的外部时钟。

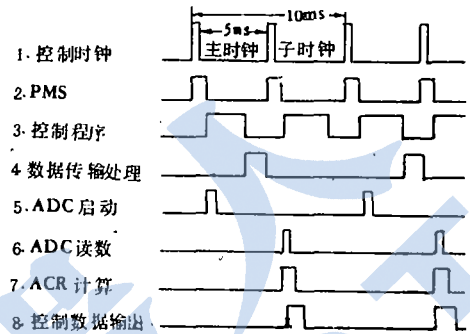


图 (3—3) 控制程序时间图

由于电源控制系统具有高阶传递函数的特性，输入信号的响应函数是比较复杂的，因此计算的磁场曲线对于束流加速可能不太适宜，存在着静态和动态误差，利用每个控制时钟的静态误差来校正运行曲线，可以克服这个问题。KEK 编制了自校正控制程序，操作员在操作台上启动它，实验表明，只需要几次校正运行曲线就能得到最佳值。

(B—CPU) 在 PMS—II 管理下执行实时的或驻留磁心的任务。系统和应用程序约占 120 K 字。大约 70K 字的曲线数据存储在磁鼓中。

曲线发生程序考虑了磁场饱和效应以及 B 与 Q 磁铁之间的磁场跟踪。操作员用输入命令把这些曲线送到磁鼓中去。

曲线管理程序有很多功能，包括曲线的登记和派遣，曲线数据输出制表，该程序在控制台上启动。

磁铁电源控制系统试验结果表明，采用自校正方法后运行质量有提高，这就是 KEK 磁铁电源控制系统的特点。目前计算机还没有按磁铁电流和磁场之间的函数关系来校正，因此控制有改善，但还不是最佳的。