

高能加速器设计思想漫谈(上)

谢家馨

高能加速器是规模庞大,技术复杂,要求精尖,它的研制需要投入巨大的人力、物力和财力。这样的科研工程,在怎样的设计思想指导下进行,显然是能否多快好省的关键问题。

每个设计人员在他的具体设计工作中,都为一定的设计思想所支配,而这个思想的形成是建筑在他业务实践中所获得的感性经验和理性知识的基础上的。由于背景各异,来自不同学科专业和不同工业部门的设计人员的设计思想不可能是相同的。然而,要想把各种工程技术和设备系统组织成一个高能加速器的有机的整体,需要有一个统一的设计思想。只有这样,才能使这个加速器各局部协调匹配、相辅相成,精确地执行指定的功能,并在规定的期限内用计划的投资建成。

这个极端重要的问题,虽然各国加速器设计者都根据自己的实践累积了大量的经验,甚至公认了许多的“不成文法”。但从文献上我们却很难找到什么可供探讨的资料。作者近年有机会和几个主要的高能加速器的设计者讨论过这个问题,结合个人多年工作的体会,总结出一些不成熟的看法。下面只就联系到设计方案的十个方面加以讨论,供有关同志参考。

(一) 三种方法的运用

实验、理论和计算是进行加速器设计缺一不可的三个方面。实验方法可以检验理论模型和计算结果,并解决不能使用理论和计算处理的问题;理论方法可以解释实验结果,提出实验要求,并为计算提供物理方程;计算方法一方面可以模拟实验,同时也为实验处理数据,一方面可以按照理论方程进行计算,同时也指出改进理论的方向。这三方面的关系可用图1表示。

加速器工作主要根据经典力学和经典电磁学的理论,这都是早已成熟的学科。加以电子数字计算机的出现,又使繁复的计算可以快捷地进行。这都为高能加速器的设计创造了有利的条件。在电磁场方面,我们可以将磁铁的横向中值场分布设计准到千分之几,将加速腔的谐振频率设计准到万分之几;在粒子运动方面,也同样可以对粒子轨道参数给出精确的描绘。显然,设计工作者应该充分运用这两个有力的手段。

另一方面,我们必须看到这两种手段的局限性。加速器设计与一般成熟的工程技术不同,它大量的问题需要在实验的基础上进行,例如:离子源电极的结构尺寸,磁

铁的纵向端部垫补,有铁氧体的加速腔的工作特性,真空盒的加工尺寸等等。企图单纯地使用理论计算指导这些问题的设计是很难行得通的。但是,在我们开始进行设计的时候,很容易只看到理论与计算方法的威力,同时,又因实验方法有条件的限制,故常有过多地依靠理论与计算处理问题而忽略实验的重要性的倾向,这是必须有意识地加以克服的。

事实上,一个成功的设计都是

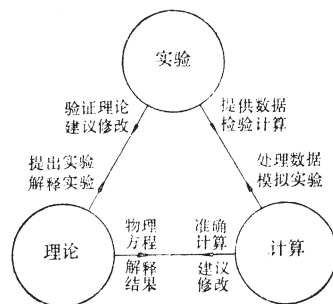


图1 三种物理方法关系示意图

正确地灵活地运用这三种方法的结果。对哪种工作或哪一部份工作应该使用哪种方法的判断,和对使用这种方法取得的结果的评价(理论有近似的问题,计算有模型的问题,实验有误差的问题)可以说是高能加速器设计“艺术”的精髓。

(二) 经济制约与性能制约

像高能加速器这样的大规模科研工程,在设计考虑中,性能良好,运行可靠,当然是十分重要的制约因素。但不能忽略的是由于它的建造投资巨大,设计考虑不能不同时受到经济上的制约。

最优设计的概念就是以经济考

虑为出发点的。从建造费用的角度,加速器正体或局部,常常包含着相互矛盾的一些因素。例如质子直线加速器,它的造价包括两个主要部份:一是高频的费用,一是腔体的费用。对一定能量的加速器而言,前者与长度成反比,而后者与长度成正比,有如图2中两条虚曲线所示。这样,总的造价为两者之和,就与长度有如图中实曲线所示的关系,即存在着一个经济上最优的长度 $L_{最优}$,它相应于最低的造价。按照这个长度进行设计,称为最优设计。美国劳伦斯实验室曾对一个200 GeV 的高能加速器的磁铁系统进行了最优设计的研究,并编有计算机程序。

不过,当我们对上面的例子做进一步分析时,就会发现在固定能量下,场强又是与长度成反比的量。如按最优长度设计,场强就会取得过高,势将引起高频击穿的问题,不能保证可靠的运行。因此,一般采用的是次优的长度 $L_{次优}$ 。这时电场较低,运行可靠,造价又距最低值不远。这是以性能制约为主的设计。

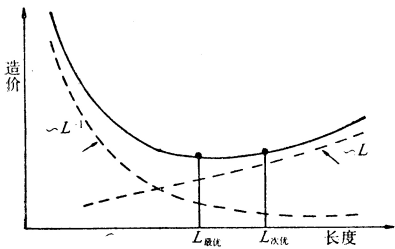


图2 直线加速器造价与长度的关系

另一方面,我们也可以举出例子,说明以经济制约为主的情况。在环形加速器束流快引出系统的设计中,冲击磁场必须在迴旋束团的空隙时间内上升才能避免束流损失。但实际上从造价考虑,美国AGS和西欧中心CPS都以损失一些束流为代价,放松上升时间的要求。类似的情况是束流流产系统,本来最好在束流迴旋一圈的时间内将束流偏转到收集靶上,美国费米加速器从经济出发,以少量束流散射到下游

部件产生较多的放射性和辐射损伤为代价,大大放松偏转时间的要求。AGS甚至不用流产系统。可见一定数量的束流损失和它所产生的放射性和辐射损伤,并不是绝对不能容许的。

上面两个例子说明:在高性能加速器设计中,不能将性能要求与经济要求绝对化,而应经过具体分析,把决策建筑在性能与经济的统一考虑的基础上。

(三) 安全系数

如将加速器系统或部件的失效率^[注]与性能指标的关系画出,常常可以得到如图3所示的曲线。即当性能指标超过一个特定值——临界值之后,失效率就会急剧地上升,而在该值之下,则失效率的变化很小。显然,为了可靠运行,设计工作者首先应该找出临界值,然后再后退一步,取为正常工作值。临界值与工作值之差,可以称做裕量;两值的比例决定安全系数。在高性能加速器的系统设计中,我们应该采用多大的安全系数?多大的裕量才是既稳妥又经济的设计?

在这个问题上,加速器有着两个相互矛盾的特点。首先,高能加速器由很多的系统、分系统和部件组成,在功能逻辑图上一一般是串联的关系。这就要求每个系统、分系统和部件的失效率很低,才能保证总体有适当的可靠性。美国费米国家加速器实验室500GeV加速器的控制系统约有10,000个部件。因为系统的可靠度为元件的可靠度的乘积,故为使正体能无故障地长期运转,部件的平均可靠度要求为99.9999%以上。另一方面,高能加速器并不是像飞机那样,不允许在运行中停机检修。实际运转时间与预期运转时间有一些差距并不一定对实用价值产生明显的影响,而经济上的考虑常常不允许在技术上过于保守。这样,安全系数又不应过大,引起不必要的经济负担。

由于对上面两个矛盾的要求侧重不同,不同的加速器设计者就采用了颇不相同的裕量政策。一般说来西欧中心的设计裕量较大,美国费米实验室的设计裕量较小。我们

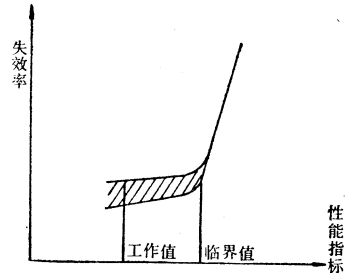


图3 失效率与性能指标的关系

很难就这个问题确定一个简单的标准。不过,如果不经分析地认为裕量愈多,工作就愈可靠,从部件到系统层层加码,其结果必然是技术上落后和经济上浪费。反之,单纯地追求经济指标,将性能指标推到接近临界状态的临界设计,也必然给加速器带来运行不可靠的严重后果。

对裕量问题的决策首先需要分析裕量与可靠性的关系。加大裕量而可靠性并无明显变化,就不应采用过大的裕量。其次要分析裕量与造价的关系。当加大裕量而造价急剧上升时,也是不应留过大的裕量的。当然,与上相反,可靠性得到明显的改进,而造价又无显著的变化,则较大的裕量成为可取的了。

(四) 避免与校正

在高性能加速器的设计过程,为了达到一个系统的技术要求,常常要面临下面的选择:是对它规定较紧的公差,使它制成后就能满足要求而不需要任何校正的措施呢?还是适当地降低它本身的公差。再采用校正手段来达到设计要求呢?这

[注] 加速器系统数目一般不大,但就在西欧中心四圈增强器的运行中,也观察到接近裕量曲线的失效规律。所以在这里以及后面,我们使用一般有关可靠性的概率概念,这样起码可以定性地说明确问题。

两个问题在一定程度上是相互补充的,但需选定谁是主要的依靠对象.

关于这方面的例子,在 高能加速器设计工作中可以说俯拾皆是. 为了保证环形加速器的正常工作,可以对由隧道地基变化产生的磁铁位移提出严格的要求:美国 AGS 加速器提出均方根偏差应小于 0.13mm , 西欧中心 CPS 甚至提出要考虑地中海潮汐的影响. 现在已知道这么严格的要求是没有必要的,也可以放松地基的要求而依靠闭轨控制来校正磁铁位置偏差的影响. 在高压加速器中,为了不使束流负载引起过大的电压波动,可以采用增大高压塔电容量的办法,也可以采用快稳线路来校正波动的办法. 在磁铁系统中,为了减少六极分量,可以将磁铁端部进行垫补,也可以使用另外的六极校正磁铁来补偿. 在直线

加速器的腔体设计中,可以更多地依靠直径加工公差来保证谐振频率,也可以更多地依靠微扰体来进行校正. 总之,一种情况是设计对象本身的公差保证达到设计要求,如图 4(A)所示;另一种情况是它本身的公差只是保证校正系统不致过大就够了,如图 4(B)所示.

对避免与校正这个问题,设计工作者有着两种不同的看法. 一是应该尽量采用校正系统来补偿主系统的偏差,因为这样使制造难度降低,对造价和时间有利,而且性能容易达到更高的要求(如主系统与校正系统的控制精度各为百分之一,则整个系统的控制精度可达万分之一). 二是应该使设计的主系统直接达到要求. 理由是采用校正系统是将困难留到以后,而且使整个系统复杂化,这样会影响可靠性.

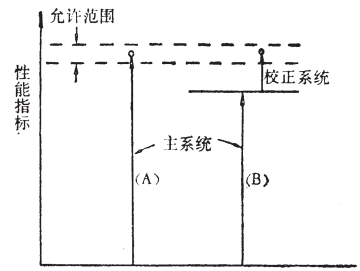


图 4 两种设计方法示意图

事实上,这个问题很难孤立地讨论,而必须联系设计对象的其他特性,例如技术难度,造价差异,完成期限等等加以统一考虑. 如果设计的系统本身直接满足性能指标,没有很大的技术困难,不致拖延研制的时间,也不导致过高的成本,当然从简单、可靠的角度出发,最好不用校正系统. 但是,如果情况相反,则校正补偿就是十分可取的措施了.