

氏 名 Di Wang

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2268 号

学位授与の日付 2021年9月 28日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study of Reliable Timing System at KEK Accelerator
Complex

論文審査委員 主 査 帯名 崇
加速器科学専攻 教授
上窪田 紀彦
加速器科学専攻 教授
佐藤 政則
加速器科学専攻 准教授
小林 鉄也
加速器科学専攻 准教授
古川 和朗
加速器科学専攻 教授
増田 剛正
高輝度光科学研究センター 光源基盤部門
主幹研究員

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 Di Wang

論文題目 Study of Reliable Timing System at KEK Accelerator Complex

My doctor thesis mainly focuses on the reliability enhancement of the timing system at KEK accelerator complex. The KEK accelerator complex consists of a 600 m long injector LINAC, SuperKEKB main ring (MR) and two light source facilities (PF/PF-AR). The SuperKEKB is an electron/positron collider which is upgraded from previous KEKB project. The LINAC operates at 50 Hz and provides beams for 4 rings through the method called pulse-to-pulse modulation (PPM).

Timing system takes an important part and controls the RF synchronization, bucket selection and trigger delivery in the accelerator control system. RF synchronization is necessary to inject the beam from LINAC into the ring. The relation between LINAC RF frequency and ring RF frequency is discussed. Apart from the synchronization between LINAC and ring, a positron damping ring (DR) is newly constructed to lower the emittance. Thus, synchronization between DR and MR increases the complexity of timing system. The fundamental frequency between Linac-MO and MR-MO is 10.385 MHz, which means 55 cycles of Linac-MO covers exactly 49 cycles of MR-MO. For laser oscillation of the RF gun, a supply of 10.38 MHz, 114.24 MHz, and 2856 MHz are required from the main drive system. The 11th harmonic (114.24 MHz) and 55th harmonic frequency (571.2 MHz) of the common frequency (10.385 MHz) are used to drive two subharmonic bunchers (SHBs). The 2856 MHz RF is used to drive the accelerator structures. Both DR and MR use 508.89 MHz as the ring RF frequency.

The goal of a timing system is to provide precise trigger signal for hardware in a scheduled sequence. The evolution of trigger delivery is introduced based on the historic order. From various kinds of timing modules for different institutes to de-facto standard event modules among accelerator facilities, the timing system becomes more flexible and scalable. The basic block of event generator (EVG) and event receiver (EVR) are discussed to understand how a timing system in modern accelerator works. Both the event modules from MRF company and SINAP are used at SuperKEKB to satisfy the demand. To construct a timing network, other modules, such as fan-out module, reflective memory module and time-to-digital converter (TDC) module are also desirable. The function and performance of these modules are introduced.

Another significant target for timing system is the bucket selection. At SuperKEKB

MR, the bunches should be equally distributed in the ring to maintain a stable operation. The injection opportunity appears based on the common frequency between LINAC and MR. The bucket selection cycle (BSC) is defined as the cycle during which all the ring buckets can be selected. The BSC is derived from the multiplication of harmonic number (230 and 5120 for DR and MR, respectively) and common frequency (10.385 MHz). For SuperKEKB, the BSC for MR is 493 μ s and BSC for DR as well as MR becomes 11.34 ms (23*493 μ s). There are several schemes to decide which RF bucket should be injected. At SuperKEKB, "BCE" and "star" scheme are commonly utilized to accommodate the physics run. After the RF bucket number is determined, the bucket selection delay should be calculated and set at EVG. The delay calculation for the selected RF bucket should base on the BSC.

In practice, the timing system has several constraints from hardware. At LINAC, the requirements mainly originate from the klystron and DR injection magnets. The klystron should be triggered at the same phase of 50 Hz AC power line (AC50) because an experiment in KEKB era showed that the beam energy is related with the AC50 phase of klystron trigger. The trigger interval between two continuous pulses should be larger than 18 ms because of charging time of klystron. Thus, only 2-ms the injection window is used for injection and 4 of 23 MR BSC combinations can be realized. The DR injection magnets need 100 ns to increase and decrease the magnetic field. Accordingly, the injection to DR is prohibited during this 10-ns range and only 31 DR buckets can be selected if 2-bunch and 2-pulse DR operation used. We choose to shift the RF phase in downstream LINAC to solve the restriction. By shift the RF phase, the chance for extraction from DR increases and all the LER RF buckets can be selected.

The detailed implementation of timing system at KEK LINAC is also discussed. The reason of sequence shift and how sequence shift is achieved are thoroughly analyzed. Another conceivable restriction between 8/9-pulse sequence shift and DR storage time is described and a solution of 16/18-pulse sequence shift scheme is chosen to be the basic structure of main timing station since 2018. By shifting the 16-pulse sequence and 18-pulse sequence, the timing system can generate the trigger at the same phase of AC50 every pulse. The algorithm of selection the sequence type, which is based on the estimation of future AC50 arrival timing, is introduced.

All these restrictions raise the complexity of the timing system. Thus, it is difficult to understand what was happening if timing system behaves abnormal. Moreover, a timing system error occurred and was not noticed because of lack of diagnosis tool. To locate the problem source and quickly handle error, several log systems for timing system are newly constructed. Firstly, the event code log system is implemented by a low-level driver program for EVR, and it works well during the elapsed two years. Then,

the AC50 log system is regarded as necessary after some brief analysis of timing system. Finally, two basic failure modes are summarized to describe the timing system error. The theoretical failure recurrence is done based on the timing log and the error source is located.

Most of the timing system errors are caused by AC50 drift. Through the computer simulation, the sequence shift algorithm is designed to handle AC50 frequency of 50 ± 0.1 Hz. But sometimes the AC50 fluctuates in 50 ± 0.2 Hz. The strong AC50 drift breaks the sequence shift logic and generate abnormal trigger signal to hardware or unexpected beam mode. Eventually, the LINAC operation stopped and causes the beam abort at SuperKEKB MR.

Several solutions are proposed to solve this problem. The 8/9-pulse sequence shift increases the tolerance of AC50 drift level because the compensation times for AC50 drift is increased. By means of RF phase shift of downstream LINAC, the 8/9-pulse sequence length becomes possible. Another possibility is to remove the AC50 dependency of timing system. Several experiments are performed to testify the relation between AC50 and beam energy. The results shows that the relation is small, and the beam energy variation caused by different AC50 phase is acceptable for SuperKEKB MR. However, the strong dependence between PF injection kicker and AC50 is observed and AC50-independent operation for LINAC timing system restricted. Thus, the idea of partially AC50-independent operation is proposed to perform normal operation under small AC50 drift (50 ± 0.1 Hz). The output for PF injection is inhibited when strong AC50 drift happens. A CompactRIO based AC50 regulator module is developed to perform the partial AC50 synchronization. The construction and test of the AC50 regulator module shows that this scheme is stable and reliable.

To improve the reliability of the timing system, the bucket selection source code review, documentation for information sharing and are also performed. The failure times of timing system are decreased, and this work contributes to the stable operation of SuperKEKB project.

博士論文審査結果

Name in Full 氏名 Di Wang

論文題目 Study of Reliable Timing System at KEK Accelerator Complex

本研究は KEK 加速器群を制御するタイミングシステムの詳細に関するものである。特に既存システムで問題になっている様々な問題に対して、いかにして原因を究明してその表面的な事象と根本的な理由の追及をおこなうことから解決策の提案に至るまでどのようなアプローチで臨むべきかということ、すなわち信頼性の高いシステムを構築するにはどうすべきかということを実際の Linac/SuperKEKB/PF/PF-AR 加速器群において実践したものである。

既存システムはイベントベースのタイミング系を活用しているため、各種タイミングを受け取った側（イベントレシーバ, EVR）側でどのような指示をどのタイミングで受け取るかを記録（ログ）することが基本となる。Wang 氏はこれまで整備されていなかったログシステムの開発に取り組み、最終的には取りこぼしの起きない高性能なログシステムを開発することに成功した。また、そこから得られる膨大なデータを解析することでエラー事象の発生する根本的な原因究明に努めた。システム故障といっても軽微なものから重大なものまでその原因・結果ともに多岐にわたるが、Wang 氏はそれらの解析をすることで電力会社から供給される 50 Hz 信号(AC50)の周波数変化に起因する事象にいくつかのパターンがあること、そしてそれ以外にも様々な複合要因があることを究明した。特に 50Hz 信号の周波数変動が原因で本来送受信すべきビームモードが変わってしまう現象が起きていることを突き止めた。さらにこれらへの対策として現在使用されているシーケンスシフト手法の比較をおこない想定される周波数変動に対する許容度を明らかにするとともに、周波数ドリフトに対して強い耐性をもつ新たなシーケンスシフトの方法を提案し実装した。Wang 氏は同時に AC50 Regulator の開発を提唱し関係者と共に迅速に開発を行い、既に実際の加速器運転に供した。この導入後にはイベントシステムが突如として停止するという現象は起きておらず Linac/SuperKEKB の安定運転に大きく寄与している。

さらに Wang 氏は根本的な対策の 1 つとして完全に商用 50 Hz 信号に依存しない加速器運転を提案し、どのような問題が生じるのかについてタイミングシステムの改修をおこなうとともにクライストロン出力安定度の測定まで行い、エネルギー安定度が十分であることを示した。その後、実際にビーム運転を行って適用可能性の検証も行った。残念ながら PF の入射パルス電源側の問題があることが分かり運転に常用するには至っていないが、2021 年夏期に PF のシステムが更新された後には、Linac の運転を商用 50Hz と非同期にすることが可能であることを実証したことになる。

また Wang 氏はソフトウェア開発においてコードレビューや情報共有を進めることが重要であることを周知して環境構築から実際の運用まで行った。その結果、共同研究者と協力しながら既存システムの問題点の発見から修正まで行うことに成功している。

審査委員会および公開発表会において Wang 氏は研究内容の詳細について発表し、質疑に対して的確に回答した。博士課程の3年間でここまでの成果を達成し、実際の Linac/SuperKEKB の運転にも大きな貢献をしている上に、今後もこの研究の延長線上にさらなる信頼性向上の可能性を示したことは特筆に値する。本人の研究開発能力が博士号取得に値することは審査員全員が納得するものであった。

博士論文自体についても他の加速器におけるタイミングシステムのレビューから始まり既存 KEK Linac での詳細説明、Wang 氏が達成した各種研究開発に関する詳細が適切に記述されており、論文の主旨及び研究内容は博士論文として妥当であると判断した。論文は英語で書かれており、本審査における発表および質疑応答もすべて英語で行われ英語能力も十分であることが確認できた。本研究に関しては国際会議 ICALEPCS で口頭発表を行うなど複数の発表を行っており、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A に投稿した論文は現在査読中である。

以上のことから本論文は学位授与に値すると認められ、審査委員全員一致で審査を合格とした。